

Resum

En aquest projecte es realitza un estudi comparatiu de les accions del corrent d'aire al voltant d'una coberta corbada per a pistes de pàdel o altres instal·lacions esportives mitjançant programes de càlcul numèric basats en la Dinàmica Computacional de Fluids (CFD). L'objectiu de l'estudi es veure com la variació de la fletxa de l'arc de la coberta o la modificació del disseny de la coberta influencien el comportament fluidodinàmic i les forces generades.

El projecte s'inicia amb un repàs dels conceptes fonamentals sobre fluxos entorn de cossos, la descripció de les tècniques bàsiques per al seu anàlisi i les accions que els caracteritzen. A continuació es descriu la metodologia CFD per al seu anàlisi i la utilització del programa de càlcul numèric ANSYS CFX que s'ha emprat en aquest projecte.

A partir d'aquí, s'exposa la creació del domini i l'estudi per a obtenir el mallat òptim. Amb el model seleccionat es procedeix a presentar el conjunt de simulacions amb CFX explicant en detall com es duu a terme l'anàlisi complet en CFD.

Es realitzen tres simulacions amb dissenys de la coberta diferents, que corresponen a: coberta simple, coberta amb biga i coberta tancada. El primer dels dissenys esmenat, és una primera aproximació del comportament del corrent d'aire al voltant de la coberta. Per a fer un disseny més proper a la realitat, s'inclouen les bigues de suport en la part frontal i posterior. Finalment, per a poder-ho comparar amb cobertes similars incloses en normativa, es simula la coberta suportada per parets anteriors i posteriors.

A partir dels resultats obtinguts de cadascuna de les simulacions, es realitza el seu anàlisi de manera comparativa per avaluar com la fletxa de l'arc de la coberta i els diferents dissenys de la coberta influeixen sobre les accions fluidodinàmiques. Es veurà com en la coberta simple i en la coberta amb biga, quan la fletxa de l'arc és molt elevada, apareix una força de sustentació negativa. A més a més, s'analitzaran detingudament els resultats de la simulació amb la coberta tancada, doncs apareix un efecte d'aspiració vertical que augmenta amb la fletxa.



Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	7
1.1. Abreviatures	7
1.2. Nomenclatura	7
2. PREFACI	11
2.1. Origen del projecte	11
2.2. Motivació	11
2.3. Requeriments previs	11
3. INTRODUCCIÓ	13
3.1. Objectius del projecte	13
3.1. Abast del projecte	13
4. CONCEPTES TEÒRICS DEL PROJECTE	14
4.1. Cobertes en forma d'arc	14
4.1.1. El Pàdel i la seva evolució	14
4.1.2. Característiques coberta corbada	15
4.2. Conceptes bàsics de l'aerodinàmica	16
4.2.1. Definició de fluid	16
4.2.2. Propietats dels fluids	16
4.2.3. Tipus de fluxos	17
4.2.3.1. Flux estacionari i no estacionari	17
4.2.3.2. Flux laminar i turbulent	18
4.2.3.3. Flux compressible i incompressible	19
4.3. Flux entorn de cossos	20
4.3.1. Tècniques bàsiques per a l'anàlisi de fluxos	20
4.3.2. Turbulència	22
4.3.3. Capa límit	24
4.3.4. Forces d'un fluid al voltant d'un cos	28
4.4. Definició del model numèric	30
4.4.1. Introducció de CFD	31
4.4.2. Metodologia	32
4.4.3. Equacions resoltes pel programa	32
4.4.4. Model de turbulència [10]	33

5. MODEL NUMÈRIC CFD	35
5.1. Creació de la geometria.....	35
5.2. Creació de la malla	36
5.3. Models de simulació	39
5.3.1. Transferència de calor	39
5.3.2. Turbulència a prop les parets.....	39
5.4. Condicions de contorn i càlcul de la solució	40
6. SIMULACIONS COBERTA SIMPLE	45
6.1. Comprovació de la malla, y +	45
6.2. Coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació	45
6.3. Distribució de velocitats i pressions	47
6.4. Coeficient de pressió	51
7. SIMULACIONS COBERTA AMB BIGA	54
7.1. Modificacions prèvies.....	54
7.2. Coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació	55
7.3. Distribució de velocitats i pressions	56
7.4. Coeficient de pressió	59
8. SIMULACIONS COBERTA TANCADA	61
8.1. Modificacions prèvies.....	61
8.2. Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació	62
8.3. Distribució de velocitats i pressions	64
8.4. Coeficient de pressió	69
8.5. Discussió resultats	70
9. COMPARACIÓ I DISCUSSIÓ DE RESULTATS	72
9.1. Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació	72
9.2. Coeficient de pressió	73
10. PROGRAMACIÓ	76
11. PRESSUPOST	78
11.1. Costos directes	78
11.2. Costos indirectes imputables	79
11.3. Cost total del projecte	80



12. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	81
12.1. Referent a l'elaboració del projecte	81
12.2. Referent a la construcció de la coberta	82
CONCLUSIONS	83
AGRAÏMENTS	85
BIBLIOGRAFIA	86
Referències bibliogràfiques.....	86
Bibliografia complementària.....	88

1. Glossari

1.1. Abreviatures

CAD: Computer-Aided Design (Disseny assistit per ordinador)

CAE: Computer-Aided Engineering

PTC: Software de CAD

CFD: Computacional Fluid Dynamics (Mecànica computacional de fluids)

CFX: Software de CFD d'ANSYS

PI: Punt d'inflexió

RANS: Reynolds Averaged Navier Stokes

SST: Shear Stress Transport

EIA: Estudi d'Impacte Ambiental

1.2. Nomenclatura

τ : Esforç tallant (Pa)

ΔF_t : Diferencial de força tangent a la superfície (N)

ΔA : Diferencial d'àrea (m²)

$\vec{V}(x, y, z, t)$: Vector velocitat ($(\vec{i}, \vec{j}, \vec{k})$) (m/s)

P : Pressió (Pa)

ΔF_n : Diferencial de força normal a la superfície (N)

P_{abs} : Pressió absoluta (Pa)

P_{atm} : Pressió atmosfèrica (Pa)

P_{rel} : Pressió relativa (Pa)

ρ : Densitat (kg/m³)

μ : Viscositat dinàmica (kg/(ms))

$\frac{\delta u}{\delta y}$: Derivada parcial respecte y de la velocitat en direcció x

Re: Nombre de Reynolds (-)

L: Longitud característica (m)

ν : Viscositat cinemàtica (m^2/s)

Ma: Nombre de Mach (-)

a: Velocitat del so en aire (340 m/s)

m: Massa (kg)

t: Temps (s)

\dot{Q} : Flux de calor (W)

\dot{W} : Potència (W)

E: Energia (J)

sist: Sistema d'estudi

T: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

B: Propietat d'un sistema

β : Derivada respecte la massa (*m*) d'una propietat del sistema (*B*) o propietat específica

g: Gravetat ($9,81 \text{ m/s}^2$)

γ : Pes específic ($\text{kg}/(\text{m}^3 \text{s}^2)$)

u: Velocitat en la direcció x (m/s)

\bar{u} : Valor mig de la velocitat en la direcció x (m/s)

u' : Component de fluctuació de la velocitat en la direcció x (m/s)

C_D : Coeficient de resistència a l'avanç (-)

$C_{D,press}$: Coeficient de resistència a l'avanç degut a les pressions (-)

$C_{D,fricc}$: Coeficient de resistència a l'avanç degut a les friccions (-)

F_D : Força de resistència a l'avanç (N)

C_L : Coeficient de sustentació (-)

F_L : Força de sustentació (N)

A_P : Àrea característica (o àrea projectada) (m^2)

C_P : Coeficient de pressió (-)

c : Corda de la coberta (m)

R : Radi o gruix de la coberta (m)

f : Fletxa de l'arc de la coberta (m)

b : Fondària de la coberta (m)

u^+ : Velocitat en direcció x adimensional (-)

y^+ o Y_{plus} : Distància a la paret adimensional, dins la capa límit (-)

h : Alçada biga tipus HEB (m)

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

Aquest projecte ha sorgit per a l'interès personal en ampliar els coneixements sobre la mecànica de fluids i, concretament, sobre l'estudi del flux entorn de cossos. És cert que el Grau en Enginyeria de Tecnologies Industrials avarca molts àmbits diferents i un cop vas cursant assignatures, pots anar definint amb més claredat quins aspectes et fascinen més. Personalment, després de cursar l'assignatura de Mecànica de Fluids a la Universitat, em vaig quedar amb ganes d'aprendre i entendre moltes més coses i anar una mica més enllà del que s'explicava dins del temari de l'assignatura.

2.2. Motivació

Tinc molt clar que vull enfocar la meua carrera professional envers al disseny de producte. Això és deu al fet que hi ha dos blocs de coneixement que em fascinen: el CAD (*Computer-Aided Design*) i el CAE (*Computer-Aided Engineering*). Abans de començar aquest projecte ja tenia un gran domini en programes de CAD com per exemple: *AutorCAD* en 2D i *SolidWorks* i *PTC Creo* en 3D. On tinc més mancances és en programes CAE. Conec àmpliament la plataforma de simulacions mecàniques de l'*ANSYS*, però de les fluídiques tinc poca experiència. Aquest projecte m'ha permès tenir un fort domini en *CFX*. A més a més, m'ha facilitat la feina en un altre projecte realitzat paral·lelament a aquest, en el qual he utilitzat el programari *FLUENT*.

Vull destacar que em sembla molt interessant tot l'estudi que es duu a terme gràcies a les simulacions. Principalment, el fet que permet fer proves de diferents models d'una peça o cos, és a dir, es poden conèixer les accions mecàniques i aerodinàmiques a la que es sotmet l'objecte d'estudi degut a accions externes abans de crear-lo.

2.3. Requeriments previs

Per tal de dur a terme aquest treball és imprescindible disposar d'uns coneixements previs de Mecànica de Fluids, per a poder aprofundir en conceptes aerodinàmics, i de software CAD i CAE, per a poder realitzar les simulacions. També són importants coneixements d'altres assignatures com Gestió de Projectes per al bon plantejament i organització del treball, entre d'altres.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar l'acció del vent sobre una coberta en forma d'arc per a pistes de pàdel o altres instal·lacions esportives. L'estudi es realitzarà mitjançant simulacions numèriques computacionals amb el programari CFX per tal de calcular el comportament fluidodinàmic del vent al seu voltant i les forces provocades sobre l'estructura.

Cal remarcar que es pretén realitzar un estudi comparatiu entre diferents dissenys de coberta i per diferents valors de la fletxa de l'arc de la coberta.

Aquest estudi és necessari degut a la manca de recomanacions de disseny en la normativa actual descrita al *Documento Básico SE-AE sobre Seguridad Estructural y Acciones en la Edificación* de Març 2006 [1].

3.1. Abast del projecte

L'estudi realitzat en aquest projecte corresponen a simulacions 2D, que ens permeten entendre el comportament de les accions que fa el vent sobre una coberta de manera precisa i simplificada. Es realitza primer una simulació amb només el perfil de la coberta, després s'hi afegeix la biga de suport al disseny i, finalment, es simula la coberta totalment tancada per columnes anteriors i posteriors. En cada cas es duen a terme quatre simulacions variant el valor de la fletxa de l'arc. Es fa un estudi comparatiu entre cada coberta per tal de veure l'efecte que produeix la variació d'aquest paràmetre sobre les accions fluidodinàmiques.

Aquest projecte no inclou el cas 3D per falta de temps, degut a la complicació que comportaria el disseny i el model en la simulació.

Aquest projecte comprèn l'anàlisi dels resultats obtinguts amb les simulacions, sense corroborar-los amb dades experimentals per manca d'aquestes.

4. Conceptes teòrics del projecte

En aquest capítol es definiran tots els conceptes fonamentals per a desenvolupar i entendre el projecte amb claredat.

4.1. Cobertes en forma d'arc

Primerament cal definir quin és l'objecte d'estudi d'aquest projecte de forma acurada. Recordar que l'objectiu d'aquest treball és estudiar l'acció del vent sobre una coberta en forma d'arc per instal·lacions esportives, en concret, per a pistes de pàdel. S'ha decidit escollir aquest esport perquè en els últims anys ha anat creixent i popularitzant-se, fins al punt que, actualment, en gairebé tots els clubs esportiu disposen d'aquest tipus d'instal·lacions.

4.1.1. El Pàdel i la seva evolució

La Federació Espanyola de Pàdel situa les arrels d'aquesta disciplina com a una activitat que es realitzava sobre la borda dels vaixells anglesos per a entretenir als passatgers al segle XIX. Al segle XX es va anar popularitzant a Nova York el *paddle tennis*, el qual es practicava als parcs de les ciutats [2]. Amb el pas dels anys aquesta activitat va anar variant, introduint per exemple tanques metàl·liques que evitessin la sortida de la pilota de la pista (*Figura 4.1*). A finals del segle XX, amb la creació de federacions, aquest va anar popularitzant-se i creixent fins a convertir-se en un dels esports més importants a nivell nacional i amb una clara evolució a nivell mundial [3].



Figura 4.1 Paddel tennis amb recinte tancat [2]



Analitzant l'evolució d'aquest esport, es pot veure que als seus orígens era un esport que es practicava a l'aire lliure i en pistes de mur. Amb el pas dels anys, ha evolucionat a jugar-se en pistes de cristall. A més a més, estan proliferant molt els clubs de pàdel d'interior i les pistes cobertes [4].

4.1.2. Característiques coberta corbada

La coberta d'aquest estudi permet cobrir una o varies pistes de pàdel d'una manera senzilla i estètica. Aquesta és la solució idònia per aquest tipus de pistes poliesportives degut a les seves dimensions ($10 \times 20 \text{ m}^2$). A la *Figura 4.2* es poden veure les dimensions que té l'estructura de la coberta de l'estudi.

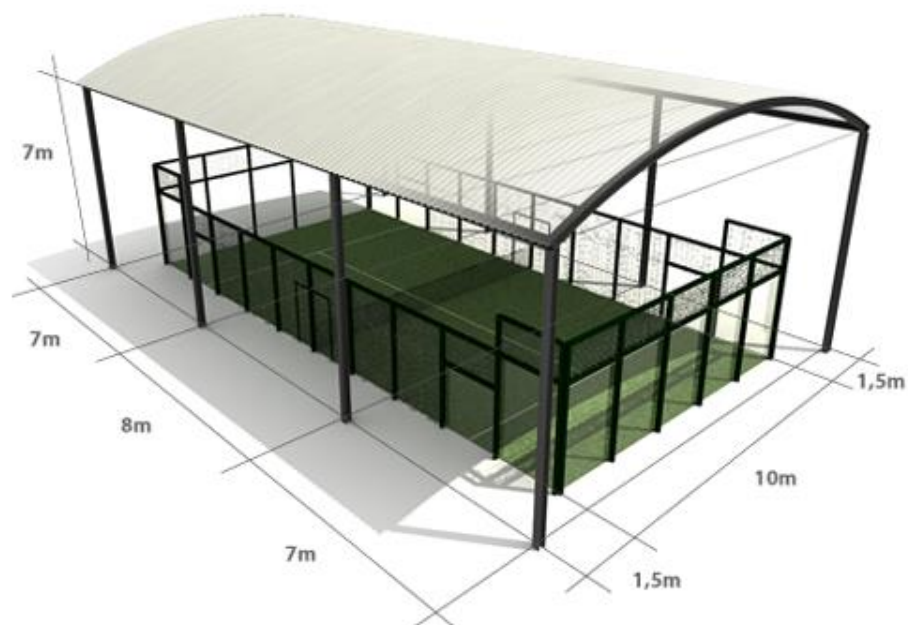


Figura 4.2 Coberta per pista de Pàdel [5]

Els avantatges d'una pista de pàdel coberta són:

- Evita el sol directe durant el migdia
- Permet jugar en dies de pluja
- No es produeix condensació en els cristalls/vidres per la nit
- Evita que la rosada del matí humitegi la pista
- Permet cobrir els passadissos laterals o perimetrals de la pista (fins a 13,3 m)

Els únics inconvenients que presenta són:

- Visió limitada, doncs la llum solar no entra directament
- El sostre limita l'alçada dels *globos*, és a dir, llençar la pilota alta i bombejada

Com es pot observar, una pista coberta presenta molts avantatges en front a una pista a l'aire lliure. Els únics inconvenients que s'han esmenat, poden ser resolts amb facilitat. El primer, si la llum solar és limitada, s'instal·larà il·luminat artificial que, a més a més, permetrà utilitzar les pistes gairebé a totes hores durant tot l'any. El segon caldrà realitzar un estudi per a determinar l'alçada òptima.

4.2. Conceptes bàsics de l'aerodinàmica

Es defineix l'aerodinàmica com la ciència que estudia el moviment d'un fluid i els efectes (aerodinàmics) que aquest produeix sobre un cos immers en ell, estigui aquest en estat estacionari o en moviment. Per tant, un cos que es trobi en mig d'un fluid estarà sotmès a uns efectes que dependran enormement de la geometria d'aquest. En aquest estudi, el fluid és l'aire[6].

4.2.1. Definició de fluid

Un fluid és una substància que es deforma contínuament quan és sotmès a un esforç tallant τ , sense importar quan petit sigui aquest. Un sòlid, en canvi, és una substància capaç de resistir aquest tipus d'esforços, experimentant una deformació estàtica.

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_t}{\Delta A}$$

eq. 4.1

Existeixen dos classes de fluids: líquids i gasos. Un líquid, al estar format per agrupacions de molècules molt properes amb grans forces cohesives, tendeixen a conservar el seu volum i formar una superfície lliure en un camp gravitatori si no està limitat per sobre. En canvi, com les molècules de gas estan molt separades entre sí, amb forces de cohesió menyspreables, un gas s'expansiona fins que troba parets que el confinen ja que no té un volum definit.

4.2.2. Propietats dels fluids

El **camp de velocitats** (V) és la propietat més important de tot fluid. Aquesta és un vector, funció de la posició i del temps, que presenta tres components escalars u , v i w :

$$\vec{V}(x, y, z, t) = \vec{i}u(x, y, z, t) + \vec{j}v(x, y, z, t) + \vec{k}w(x, y, z, t)$$

eq. 4.2



La velocitat interactua amb altres propietats del fluid, com ara la pressió, la densitat i la viscositat.

La **pressió** (P) és l'esforç (de compressió) en un fluid en repòs. És defineix segons la següent equació:

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F_n}{\Delta A}$$

eq. 4.3

On:

ΔF_n és la força normal sobre una àrea.

La pressió absoluta P_{abs} és sempre positiva, tot i que en moltes ocasions resulta més còmode treballar amb pressions relatives P_{rel} que relacionen la pressió absoluta amb una pressió de referència.

$$P_{abs} = P_{ref} + P_{rel}$$

eq. 4.4

Aquesta equació permet que la pressió relativa prengui valors positius o negatius segons sigui major o menor que la pressió de referència.

La **densitat** (ρ) d'un fluid és la massa per unitat de volum. La densitat dels gasos varia quasi de forma proporcional a la pressió. La densitat corresponent a l'aire és de $1,2 \text{ kg/m}^3$.

Una altra propietat dels fluids és la **viscositat**, entenent-se com la resistència que presenta quan s'aplica un esforç tallant. L'equació següent és la llei de la Viscositat de Newton. Aquesta governa el comportament de la majoria de fluids, classificant-se aquests com a fluids Newtonians.

$$\tau = \mu \frac{\delta u}{\delta y}$$

eq. 4.5

4.2.3. Tipus de fluxos

4.2.3.1. Flux estacionari i no estacionari

El flux és un fluid en moviment. Aquest es descriu en funció de variables físiques com la velocitat, pressió, densitat i temperatura, presents en tots els punts del fluid. Quan aquestes

variables són constants al llarg del temps, es tracta d'un flux **estacionari**. En aquest cas, les variables del fluid que arribin a un determinat punt seguiran movent-se al llarg de la *línia de corrent* que passa per aquest punt. Entenem línia de corrent com la línia imaginària que en un instant donat és tangent al vector velocitat en tot punt (*Figura 4.3*).

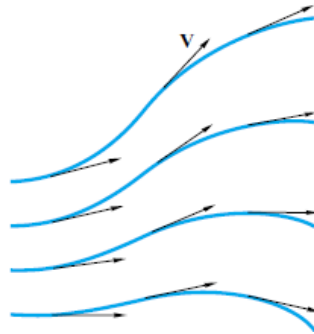


Figura 4.3 Mètode més comú de presentació de patrons de flux: Línies de corrent [6]

Quan es tracta d'un flux **no estacionari**, el valor de les variables característiques en un punt poden variar d'un instant de temps a un altre. Així doncs, les línies de corrent poden canviar de direcció, per tant, una partícula pot seguir una línia de corrent en un instant i una altre diferent a l'instant següent.

4.2.3.2. Flux laminar i turbulent

Per determinar el comportament laminar o turbulent dels *fluids newtonians* (fluids que es comporten segons l'eq. 4.5) s'utilitza el nombre de Reynolds **Re**[7]. Aquest paràmetre adimensional relaciona la densitat del flux, la velocitat u , i la seva viscositat amb la longitud característica L del problema d'estudi:

$$Re = \frac{\rho u L}{\mu} = \frac{u L}{\nu}$$

eq. 4.6

La viscositat cinemàtica ve determinada per: $\nu = \frac{\mu}{\rho}$ en m²/s, on μ és la viscositat dinàmica.

El nombre de Reynolds es pot interpretar com la relació entre les forces inercials i les forces viscoses d'un fluid:



$$Re = \frac{\text{Forces inercials}}{\text{Forces viscoses}}$$

eq. 4.7

En un flux **laminar**, les capes del fluid llisquen una sobre l'altra, és a dir, el flux és de naturalesa ordenada. Les forces viscoses associades al fluid són d'un ordre de magnitud major que les forces d'inèrcia, per tant, el nombre de Reynolds tindrà valors baixos. En els llibres més moderns i actuals, el límit per règim laminar en conductes s'accepta com $Re < 3.500$.

En canvi, pel que fa al flux **turbulent**, es desenvolupen fluctuacions irregulars del flux, és a dir, existeix un gran intercanvi de quantitat de moviment entre partícules del fluid. Dit d'una altra manera, és un flux inestable. Tot i que en aquest tipus de flux les forces d'inèrcia són predominants, les forces viscoses segueixen jugant un cert paper. Els valors del nombre de Reynolds pels quals apareix aquest tipus de flux s'estableixen entre $5.000 < Re < 10^5$.

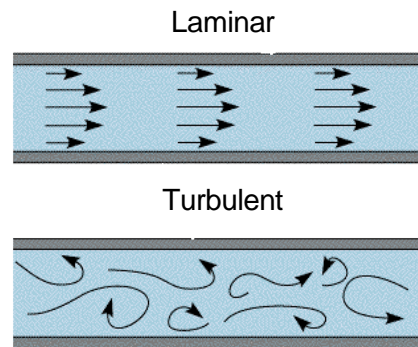


Figura 4.4 Representació flux laminar i turbulent [8]

Per a valors de nombre de Reynolds compresos entre $3.500 < Re < 5.000$ per flux en conductes, el flux es considera **transitori**, les forces inercials i viscoses són d'un mateix ordre de magnitud. En aquest tram és impossible determinar amb precisió les característiques associades al flux com esforços tallants, a causa del caràcter inestable del propi fluid. No existeix repetibilitat en la realització de mesures.

4.2.3.3. Flux compressible i incompressible

Un flux es classifica en compressible i incompressible depenent del nivell de variació de la densitat del fluid durant aquest flux. La incompressibilitat és una aproximació, es diu que el flux es incompressible si la densitat roman aproximadament constant al llarg del flux. Per poder determinar si les variacions de la densitat són lo suficientment petites es fa servir el nombre de Mach **Ma**[9]:

$$Ma = \frac{u}{a}$$

eq. 4.8

El nombre de Mach és adimensional i relaciona la velocitat u del fluid amb la velocitat del so a en el fluid, és a dir, la velocitat de propagació de les pertorbacions de pressió a través del medi fluid. Es considera que per valors de $Ma > 0,3$ els efectes de compressibilitat s'han de tenir en compte.

4.3. Flux entorn de cossos

Els fluxos externs al voltant d'un cos immers en una corrent fluida presenten efectes viscosos tallants per la condició de no lliscament a prop de les superfícies dels cossos, però són pràcticament no viscosos allunyats del cos. Per a estudiar el comportament d'un flux al voltant d'un cos cal entendre els conceptes que es desglossen en aquest capítol.

4.3.1. Tècniques bàsiques per a l'anàlisi de fluxos

En tots els casos, el flux ha de satisfer les tres lleis de la conservació de la mecànica, una relació d'estat i les condicions inicials i de contorn apropiades:

- Conservació de la massa (continuitat).
- Conservació de la quantitat de moviment (segona llei de Newton eq. 4.9).

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = \frac{d}{dt}(mV)$$

eq. 4.9

- Conservació de l'energia (primer principi de la termodinàmica eq. 4.10).

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}_{sist}$$

eq. 4.10

- Una relació d'estat com $\rho = \rho(p, T)$.
- Condicions de contorn sobre superfícies sòlides, interfases, entrades i sortides.

Tant si es fa un anàlisi integral com diferencial, aquestes cinc lleis han d'estar expressades



en termes matemàtics i s'han de resoldre mitjançant mètodes numèrics. A continuació es detallen les tres primeres lleis. Totes tres lleis parteixen d'una mateixa idea, el **teorema de Transport de Reynolds** (eq. 4.11), el qual relaciona la derivada temporal d'una propietat del sistema amb la variació d'aquesta propietat en un volum de control. Entenem per volum de control una regió específica de l'espai que el sistema pot ocupar en un instant determinat, amb independència del fet que el sistema s'hi mantingui o no.

$$\frac{d}{dt}(B_{sist}) = \frac{d}{dt} \left(\int_{CV} \beta \rho dV \right) + (\beta \rho AV)_{out} - (\beta \rho AV)_{in}$$

eq. 4.11

I. Conservació de la massa

La conservació de la massa implica que $\frac{dm}{dt} = 0$. Fent referència al teorema de Transport de Reynolds (eq. 4.11), en aquest cas $B = m$ i, per tant, $\beta = \frac{dm}{dm} = 1$. Per a un volum de control fix i no deformable i amb flux estacionari o permanent i incompressible, l'equació seria:

$$\int_{SC} \vec{V} \cdot \vec{n} dA = 0$$

eq. 4.12

II. Conservació de la quantitat de moviment

En la segona llei de Newton (eq. 4.9), la propietat que es deriva és la quantitat de moviment mV . Per tant, la variable és $B = mV$ i $\beta = \frac{dB}{dm} = V$. Al aplicar el teorema del transport de Reynolds per a un volum de control no deformable i amb flux permanent, s'obté l'equació següent:

$$\frac{d}{dt}(mV)_{sist} = \sum \vec{F} = \int_{SC} \vec{V} \rho (\vec{V} \cdot \vec{n}) dA$$

eq. 4.13

On el terme $\sum \vec{F}$ és el vector suma de totes les forces que actuen sobre el volum de control: forces de volum (gravitatòries) i forces de superfície (pressió i tallants).

III. Conservació de l'energia

S'aplica el teorema del transport de Reynolds a la primera llei de la termodinàmica (eq. 4.10) on B és la energia E i l'energia per unitat de massa és $\beta = \frac{dE}{dm} = e = u + \frac{1}{2}V^2 + gz$.

L'equació per a un volum de control és la següent.

$$\dot{Q} - \dot{W} = \left(\frac{dE}{dt} \right)_{sist} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CV} e_e \rho_e \bar{V}_e \cdot d\bar{A}_e - \int_{CV} e_i \rho_i \bar{V}_i \cdot d\bar{A}_i$$

eq. 4.14

Si el flux és permanent, incompressible i es considera un perfil de velocitats uniforme s'obté el que es coneix com **equació de Bernoulli** (eq. 4.15).

Quan es parla d'un flux entorn un cos, cal conèixer en detall totes les interaccions que hi ha entre ells. És molt important estudiar el comportament que té aquest fluid al voltant del cos, és a dir, entendre la velocitat que té el fluid al resseguir la geometria i el valor de la pressió que aquest exerceix sobre determinades parts de l'objecte. Tot això pot ser explicar amb el **principi de Bernoulli**, postulat per aquest enginyer l'any 1738, qui va trobar una relació matemàtica entre la pressió i la velocitat en una línia de corrent. La relació en un fluid ideal és la següent:

$$P + \gamma z + \frac{\rho v^2}{2g} = K$$

eq. 4.15

On $P + \gamma z$ és la pressió estàtica, $\frac{\rho v^2}{2g}$ és la pressió dinàmica i K és una constant.

Aquesta equació expressa que al llarg d'una línia de corrent per un fluid ideal i sense cap màquina, la suma de pressió estàtica i dinàmica en qualsevol punt és manté constant. És a dir, en la zona o punts del perfil on la velocitat sigui màxima, la pressió serà mínima i viceversa.

4.3.2. Turbulència

L'acció del vent (aire) és indiscutiblement aleatòria i subjecte a la turbulència. Malgrat no existir una definició precisa de turbulència, l'essència del concepte resideix en tot un seguit de característiques que s'exposen a continuació:

- Tot flux turbulent és **irregular**, caòtic. Això en dificulta una descripció determinista, donat que tota mesura de qualsevol magnitud física comporta fluctuacions aleatòries en l'espai i el temps.
- Presenta un efecte de mescla, o **difusivitat**, que produeix un increment de les velocitats de transferència, quantitat de moviment, calor i matèria, entre d'altres.



- És rotacional i tridimensional atès que es caracteritza per alts nivells de **fluctuació de vorticitat**. Entenem vorticitat com a la magnitud física que quantifica la rotació d'un fluid.
- Un flux viscos és **dissipatiu** a causa de l'acció dels esforços viscosos. És necessària una aportació continuada d'energia.
- Els fluxos turbulents sempre s'esdevenen a **Re elevats**. La turbulència sempre s'origina arrel d'inestabilitats en fluxos laminars quan Re comença a ser gran.
- La turbulència és un fenomen **continu**, atès que fins i tot les escales més petites que poden distingir-se en un flux turbulent són molt majors que qualsevol escala de longitud molecular.

Així, podem considerar la turbulència com a un fenomen regit per les equacions de la mecànica de fluids.

Una manera de definir quantitativament la turbulència és mitjançant les fluctuacions de les magnituds que caracteritzen al fluid, per exemple la velocitat (tot i que pot ser per a qualsevol altre magnitud) [10]. Sigui u la velocitat qualsevol del fluid es pot representar com a la suma del seu valor mig \bar{u} i una component de fluctuació u' , tal com es representa en la *Figura 4.5*.

$$u = \bar{u} + u'$$

eq. 4.16

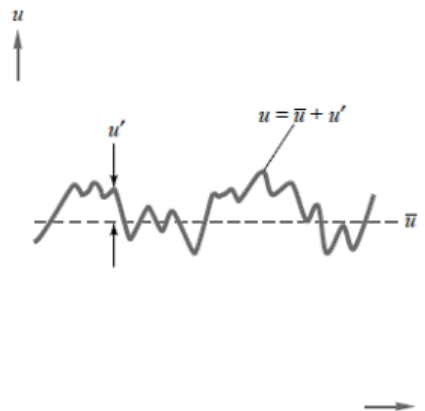


Figura 4.5 Fluctuació de la velocitat de la turbulència

Si es substitueix aquesta expressió (eq. 4.16) en les equacions de continuïtat i les de Navier-Stokes s'obté:

$$\frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} = 0$$

eq. 4.17

$$\rho \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} = -\frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \rho g_x + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \rho \overline{u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \rho \overline{u'w'} \right)$$

eq. 4.18

On $-\rho \overline{u'^2}$ i $-\rho \overline{u'w'}$ són negligibles i $-\rho \overline{u'v'}$ són els esforços turbulents deguts a les fluctuacions. Per tant, en un flux turbulent els esforços tangencials tenen dues components, una laminar deguda a la viscositat i una turbulenta deguda a les fluctuacions de les velocitats, tal com es pot veure en l'eq. 4.19. Per modelar les tensions turbulentes, es pot utilitzar el concepte de viscositat turbulenta (o de remolí) que fou introduït per *Boussinesq*.

$$\tau = \mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \rho \overline{u'v'} = \tau_{laminar} + \tau_{turbulenta}$$

eq. 4.19

Més endavant, a l'apartat 5.2.3. *Models de simulació*, es veurà com es representa la turbulència i els diversos models computacionals que s'usen per a modelitzar-la.

4.3.3. Capa límit

En un cas idealitzat i amb un fluid no viscos, el flux al voltant d'un cos cilíndric seria tal i com es mostra a la *Figura 4.6(a)*, on les línies de corrent contornegen l'objecte resseguint la seva geometria. No obstant, els fluxos reals són viscosos i presenten fenòmens de transport, com la difusió de massa, viscositat (fricció) i conducció tèrmica. Aquesta viscositat que presenten els fluxos reals infereix en la capacitat que té un fluid en resseguir el contorn d'un cos. Apareix un frec intern entre les diferents capes de fluid i entre el fluid i el sòlid. Com a conseqüència, el flux real al voltant del cos cilíndric seria el de la *Figura 4.6(b)*.



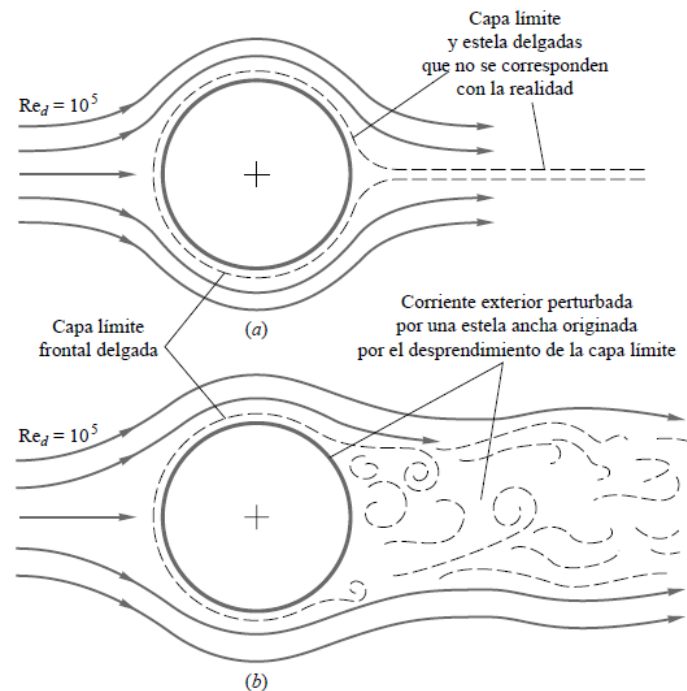


Figura 4.6 Il·lustració del flux al voltant d'un cos cilíndric: (a) flux ideal no real; (b) flux real

El freg entre fluid i sòlid s'explica mitjançant la condició de no lliscament. No hi ha desplaçament entre fluids i sòlids en contacte i, per tant, tota partícula d'un fluid en contacte amb un sòlid té sempre la velocitat d'aquest sòlid.

La resta de capes més allunyades del fluid es veuen també afectades pel freg intern, a causa de la viscositat de tot el fluid. Aquestes capes disminueixen la seva velocitat de forma proporcional a la distància a la que es troben de l'objecte. Arriba un punt on les capes del fluid ja no es veuen afectades per la capa interna. A partir d'aquest, trobem el que s'anomena **flux potencial** o no viscos.

La zona més propera a la superfície del cos, on el fluid es veu alterat per la condició de no lliscament amb el sòlid es coneix com a **capa límit**. Considerem com a capa límit la zona en la que el fluid està en contacte amb el sòlid fins que assoleix el 99% de la velocitat del flux potencial.

Es diferencia entre capa límit laminar i capa límit turbulenta. La primera es caracteritza per tenir un comportament ordenat on dominen les forces viscoses i, per tant, les capes de fluid llisquen suaument sense interactuar entre elles. La segona presenta un gradient de velocitat gran a prop de la paret i un comportament fluctuant on s'hi formen vòrtexs de diferents mides.

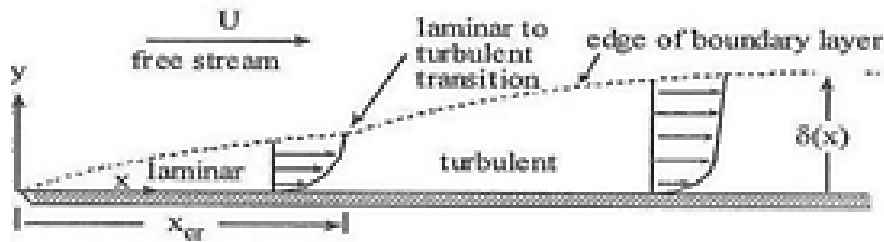


Figura 4.7 Estructura i transició de la capa límit

La capa límit va variant a mesura que el flux es desenvolupa, tal com es pot veure en la *Figura 4.7*. Al principi és laminar, passa per un període de transició i finalment és turbulenta. Cal destacar que a la zona de capa límit turbulenta es genera una subcapa laminar. Aquesta és la **subcapa viscosa**, on la velocitat tendeix a zero. Mencionar que hi ha situacions molt específiques en que pot existir només capa límit laminar o, alternativament, que aquesta sigui molt petita i predomini la turbulenta.

A la *Figura 4.7* es pot observar també que la capa límit laminar presenta un menor gradient de velocitat a la paret. Aquest fet es tradueix en una resistència a l'avanç menor, ja que les forces internes de cisallament són petites. Per contrari, una capa límit turbulenta té un major gradient de velocitat mitjana a la paret, fet que comporta una resistència a l'avanç major. Aquesta característica no implica que s'hagi d'evitar l'aparició de capa límit turbulenta, ja que en molts casos pot ser beneficiosa, doncs costa molt més que es desprengui en front de gradients de pressió adversos.

El **despreniment de la capa límit** es deu a una pèrdua de la quantitat de moviment del fluid proper a la superfície del cos, tal com va demostrar Prandtl. És a dir, es produeix despreniment quan el fluid es mou sota un gradient advers de pressions, $\frac{dp}{dx} > 0$. Quan la pressió disminueix, $\frac{dp}{dx} < 0$, es diu que hi ha un gradient favorable i, en aquestes condicions, no es presenta mai la separació de la capa límit. En la corrent sobre un cos submergit, per exemple el de la *Figura 4.6(b)*, el gradient favorable es presenta a la part frontal del cos i l'advers a la part posterior.

En la *Figura 4.8* s'il·lustra el cas general. Amb un gradient favorable (*Figura 4.8(a)*), el perfil és convex, no hi ha punt d'inflexió (PI) i no hi ha separació. Els perfils laminars d'aquest tipus són molt resistents a la transició a la turbulència. Amb gradient de pressió nul (*Figura 4.8(b)*), el punt d'inflexió està en la pròpia paret del cos. No hi ha separació i el flux es fa turbulenta.



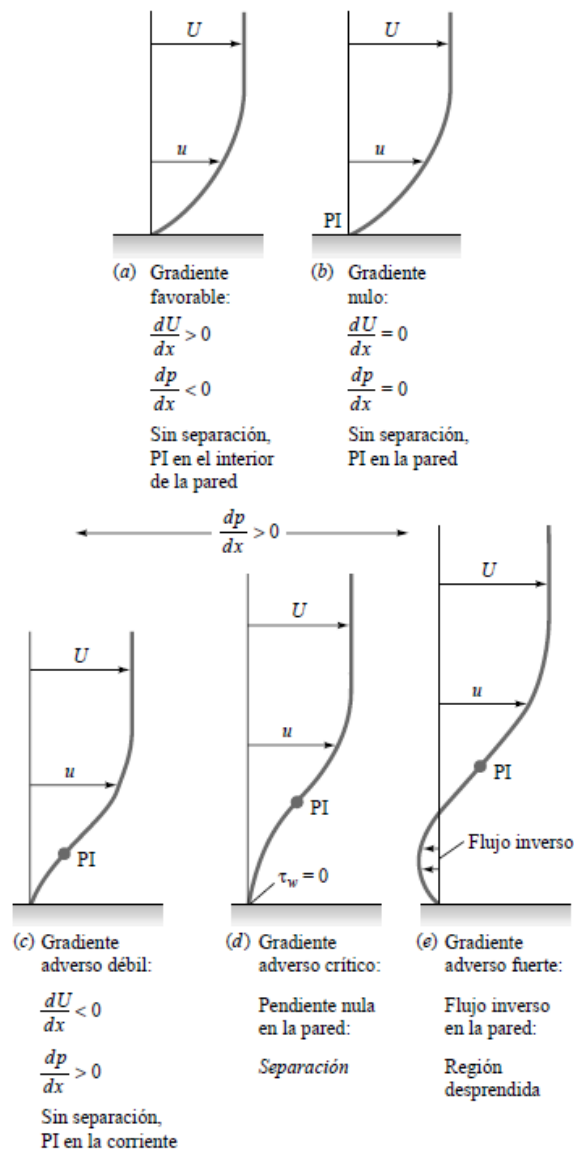


Figura 4.8 Efecte del gradient de pressió en el perfil de velocitats a la capa límit

Si el gradient de pressió és advers (*figures 4.8(c)(d)(e)*), el punt d'inflexió està a la capa límit a una distància de la paret que augmenta amb la intensitat del gradient advers. Per a un gradient advers dèbil (*Figura 4.8(c)*), el flux encara no es desprèn. Amb un gradient advers moderat s'assoleix una situació crítica (*Figura 4.8(d)*), on l'esforç tallant a la paret és nul. Això defineix el punt de separació ($= 0$), ja que qualsevol gradient més fort produirà una corrent de recirculació a la paret (*Figura 4.8(c)*): el gruix de la capa límit creix considerablement i la corrent principal es desprèn o es separa de la paret (*Figura 4.6(b)*).

En desprendre's la capa límit, es forma una zona de depressió que rep el nom de **deixant** o **estela**. El deixant és una zona de pressions baixes, la qual es caracteritza per augmentar la resistència a l'avanç i reduir les forces de sustentació.

4.3.4. Forces d'un fluid al voltant d'un cos

Quan un cos de forma arbitrària es submergeix en una corrent fluida, el fluid exerceix sobre ell forces i moments. En la direcció paral·lela a la corrent no pertorbada la força sobre el cos i positiva en sentit cap a on circula el fluid es denomina força de **resistència a l'avanç** o *drag*. Perpendicularment aquesta i en la direcció perpendicular a la corrent no pertorbada, hi ha la força de **sustentació** o *lift*. Aquesta component té un paper important, permet suportar el pes d'un cos o mantenir-lo flotant. Quan la peça és simètrica respecte al pla format pels eixos de resistència i sustentació, el problema es pot simplificar a un estudi bidimensional.

Cada una d'aquestes dues forces té un coeficient adimensional associat. Aquests són el **coeficient de resistència a l'avanç** o *drag coefficient* (C_D) i el **coeficient de sustentació** o *lift coefficient* (C_L).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_p} \quad ; \quad C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \rho v^2 A_p}$$

eq. 4.20

On A_p és l'àrea projectada.

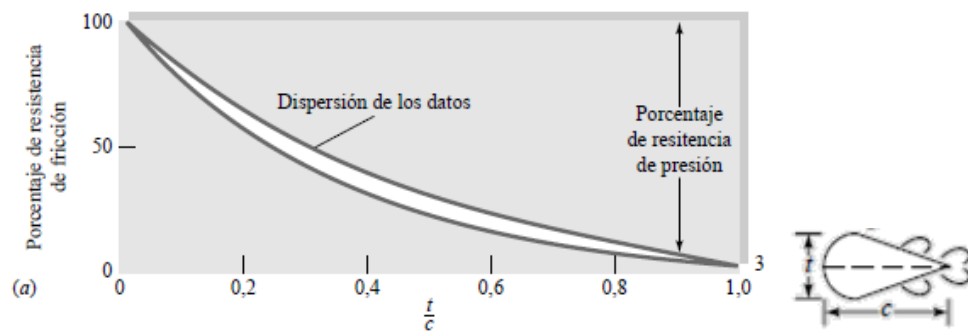
El coeficient de resistència a l'avanç es pot dividir en dos components, per una banda el **coeficient degut a les pressions**, que determina la resistència generada per la diferència de pressions entre la regió d'impacte de l'aire i la de sortida, on la corrent s'ha després. Per altre banda, el **coeficient degut a les friccions** que determina l'esforç aplicat tangencialment a la paret de la superfície del cos.

$$C_D = C_{D,press} + C_{D,fricc}$$

eq. 4.21

La contribució de cada coeficient depèn en gran mesura de la forma del cos, especialment del seu gruix o, si es tracta d'una coberta, de la fletxa de l'arc. Al *Gràfic 4.1* es mostra quina és l'aportació de cada component al coeficient total de resistència a l'avanç segons la geometria del cos. Quan existeix un gruix t molt petit, la repercussió del coeficient de resistència a l'avanç per fricció és propera al 100%. En canvi, quan el gruix t és igual a la corda c , el coeficient degut a la fricció representa només un 3% del coeficient de resistència a l'avanç total.





Gràfic 4.1 Aportació percentual al coeficient de resistència a l'avanç en funció de la geometria [6]

Quan una corrent fluida es troba un cos submergit en ella, hi ha canvis locals en la velocitat al voltant de l'objecte i, conseqüentment, canvis en la pressió estàtica, tal com postula el teorema de Bernoulli. La distribució de pressió determina també la sustentació, el moment de capcineig i la resistència deguda a la forma del cos. Aquesta pressió s'expressa habitualment en termes de **coeficient de pressió** (C_P). Aquest és adimensional i quantifica la diferencia entre la pressió local i la del corrent lliure. Normalment, es pren la pressió de la corrent lliure com a pressió de referència. Ve determinat per la següent equació [11].

$$C_P = \frac{P - P_{Ref}}{\frac{1}{2} \rho v^2}$$

eq. 4.22

On P_{Ref} i v són la pressió i la velocitat del flux potencial respectivament.

Si substituïm l'equació de Bernoulli (eq. 4.15) a l'equació 4.22, queda de la següent forma:

$$C_P = 1 - \left(\frac{V}{V_{Ref}} \right)^2$$

eq. 4.23

Per tant, com $\left(\frac{V}{V_{Ref}} \right)^2$ no serà mai negatiu, el valor màxim del coeficient de pressió és 1 i correspon al valor en el punt d'estancament. Un C_P positiu, implica que la pressió local és més alta que la pressió de la corrent fluida i, per tant, s'exerceix una pressió incident sobre el cos, té tendència a comprimir-se. En contra, un C_P negatiu, suposa una pressió menor i s'entén com a una succió, tendeix a expandir-se.

El coeficient de sustentació i el coeficient de pressió estan relacionats, tal com es pot observar en l'equació següent:

$$C_L = \int_{CS} \frac{C_{pi}(x) - C_{pe}(x)}{c} dx$$

eq. 4.24

On C_{pi} i C_{pe} són els coeficient de pressió en la superfície interior i superior del perfil, respectivament i c és la corda del perfil.

Per a l'anàlisi d'aquest coeficient sobre un cos és molt útil realitzar un diagrama o croquis, representant el coeficient de pressió com a una línia perpendicular a la superfície del cos i tan allargada com el seu valor al llarg de tot el perfil (*Figura 4.9*). Una altra manera molt útil per a representar aquest coeficients al llarg de tota la superfície és fent un gràfic en funció d'una distància x , per exemple la corda d'una coberta corbada.

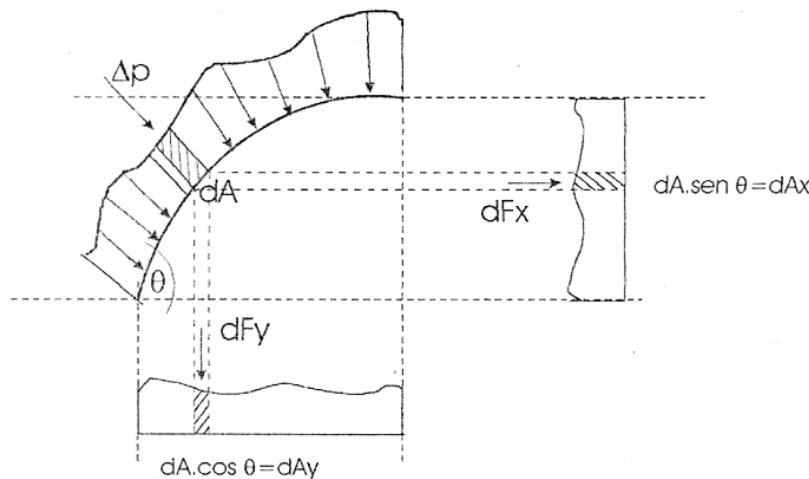


Figura 4.9 Coeficient de pressió i forces resultats de les pressions externes sobre una coberta corbada

4.4. Definició del model numèric

En aquest capítol es presenta una breu justificació del perquè de l'ús d'eines CFD per a les simulacions d'aquest projecte. S'explica també quines són les equacions fonamentals que utilitza el programari per a determinar la solució i quin és el millor model per a simular la turbulència.



4.4.1. Introducció de CFD

L'estat físic de qualsevol fluid (gas o líquid) està governat pels tres principis fonamentals de conservació de la massa, la quantitat de moviment i l'energia. La Dinàmica de Fluids Computacional, coneguda com CFD per les sigles en anglès, és el conjunt de tècniques que permeten resoldre les equacions que deriven dels tres principis anteriors, mitjançant els quals s'obtenen els camps de velocitat, temperatura i pressió en el fluid estudiat [12].

La CFD va començar als anys 60 a la indústria aeroespacial i, des d'aleshores, ha madurat convertint-se a partir dels anys 80 en una eina vital per a moltes indústries per les que la predicció del flux de fluids és important. Als anys 90 es va expandir de forma significativa a diferents aplicacions i processos industrials en els que intervé transferència de calor, reaccions químiques (com la combustió), fluxos bifàsics, canvis de fase, transferència de massa i esforços al interactuar amb sòlids, entre altres.

La CFD treballa dividint el domini d'interès en una sèrie de petits volums discrets mitjançant una malla. Les propietats físiques del fluid, tals com la temperatura o la velocitat, són calculades en cadascun d'aquests volums com solució de les equacions fonamentals.

Les possibilitats d'aplicació de la CFD a diferents processos són enormes. Alguns exemples són:

- Sistemes de calefacció, ventilació, climatització i refrigeració
- Aeroespacial
- Indústria agroalimentària
- Indústria automoció
- Energia
- Indústria química
- Indústria electrònica
- Indústria biomèdica
- Indústria naval
- Indústria del metall
- Indústria esportista
- Medi ambient

Els avantatges de la CFD són:

- Prediu les propietats del fluid amb detall en el domini estudiat.
- Ajuda al disseny i al prototipatge, obtenint solucions ràpides evitant experiments cars.
- S'obté una visualització i animació del procés en termes de les variables del fluid.

Els inconvenients de la CFD són:

- Es necessiten usuaris amb ampla experiència i formació especialitzada.
- Consumeix recursos de hardware i software que requereixen inversions significatives.
- En alguns casos, el cost computacional és elevat.

4.4.2. Metodologia

Per a realitzar l'anàlisi CFD d'aquest projecte s'utilitzarà el programa de càlcul numèric *CFX* de la plataforma *Ansys Workbench*. *Ansys CFX* és un software d'alt rendiment, que permet trobar solucions fiables i precises de forma ràpida i robusta. A més a més, avarca una abundant selecció de models físics per a capturar pràcticament qualsevol tipus de fenomen relacionat amb el flux de fluids [13].

4.4.3. Equacions resoltes pel programa

Els programaris de simulació resolen les equacions fonamentals en forma diferencial sobre dominis fluids dividits en elements o volums finits, és a dir, calculen la solució per als nodes definits en el mallat de forma iterativa fins que la solució convergeix. En aquest cas s'utilitzen dues equacions principalment que són: l'equació diferencial de conservació de la massa i l'equació diferencial de la quantitat de moviment. Ambdues referents a un flux estacionari, incompressible i newtonià.

I. Conservació de la massa

Aplicant els conceptes bàsics de la conservació de la massa a un volum de control diferencial i en les tres direccions dels eixos de coordenades s'obté l'equació següent:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w) = 0$$

eq. 4.25

Per a un flux estacionari es té que el terme $\frac{\partial}{\partial t} = 0$ i, per tant, totes les propietats són únicament funció de la posició. A més a més, si el flux és incompressible, els canvis de densitat són negligibles, és a dir, $\rho = \text{constant}$ i $\frac{\partial \rho}{\partial t} = 0$ i així doncs queda la següent equació.



$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

eq. 4.26

II. Conservació de la quantitat de moviment

Si s'aplica la segona equació de Newton (eq. 4.9) al moviment d'un flux dins d'un volum de control diferencial, s'obtenen les tres components de l'equació diferencial de la quantitat de moviment lineal. Per a fluids newtonians, les tensions viscoses són proporcionals a les velocitats de deformació de l'element fluid i al coeficient de viscositat, μ . Aquestes equacions es coneixen com **a les equacions de Navier-Stokes**. Per a un flux incompressible amb densitat constant i viscositat, les equacions de Navier-Stokes són en cada direcció de l'espai:

$$\rho g_x - \frac{dP}{dx} + \mu \left(\frac{d^2 u}{dx^2} + \frac{d^2 u}{dy^2} + \frac{d^2 u}{dz^2} \right) = \rho \frac{du}{dt}$$

eq. 4.27

$$\rho g_y - \frac{dP}{dy} + \mu \left(\frac{d^2 v}{dx^2} + \frac{d^2 v}{dy^2} + \frac{d^2 v}{dz^2} \right) = \rho \frac{dv}{dt}$$

eq. 4.28

$$\rho g_z - \frac{dP}{dz} + \mu \left(\frac{d^2 w}{dx^2} + \frac{d^2 w}{dy^2} + \frac{d^2 w}{dz^2} \right) = \rho \frac{dw}{dt}$$

eq. 4.29

4.4.4. Model de turbulència [10]

En l'apartat 4.3.2. *Turbulència* s'ha explicat que els esforços viscous presenten dues components, la laminar i la turbulenta (eq. 4.16). Per modelar els esforços turbulents la idea resideix en el fet que si un flux turbulent es caracteritza per la difusivitat i la dissipació, aleshores es pot assumir un mecanisme similar al de la difusió i dissipació del flux laminar. Així el problema es pot reduir a modelar el que es coneix com la **viscositat turbulenta** μ_T introduïda per Bousinesq.

El model matemàtic que s'ha utilitzat per al càlcul del flux turbulent del nostre cas és el RANS (*Reynolds Averaged Navier Stokes*) que consisteix en resoldre les equacions promitjades en funció de les fluctuacions instantànies de totes les propietats on els esforços turbulents queden en funció de la viscositat turbulenta. Per calcular la μ_T , sovint és imprescindible l'ús de models de *tensor de Reynolds*, consistents en l'estimació directa d'aquest terme sense

passar per la hipòtesi de Boussinesq. El model *Eddy Viscosity Model* n'és un exemple.

En aquest projecte s'utilitza el model de turbulència de SST o ***Shear Stress Transport***. Aquest model és la combinació de dos models ja existents: el ***k-ε*** i el ***k-ω***. Tots tres són models Eddy-viscosity. El model *k-ω* calcula amb més precisió els efectes propers a la paret o superfície de l'objecte d'estudi, en canvi, el *k-ε* modela millor les propietats lluny de la paret. El model SST utilitza el millor de cadascun dels dos anteriors en funció de la distància a la paret (*Figura 4.10*).

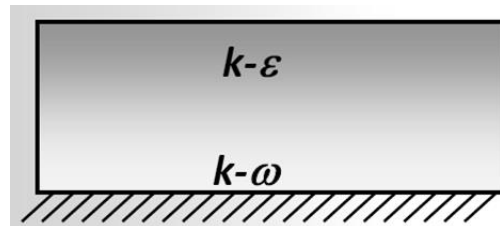


Figura 4.10 Model emprat pel SST en funció de la distància a la paret

Com a resultat, el model SST calcula amb molta precisió la separació de la capa límit degut a gradients de pressió adversos. Això és fonamental per aquest projecte doncs, tal i com es veurà en quasi tots els casos simulats, que hi haurà separació de la capa límit sobre la coberta (*Figura 4.11*) i formació de deixants de grans dimensions.

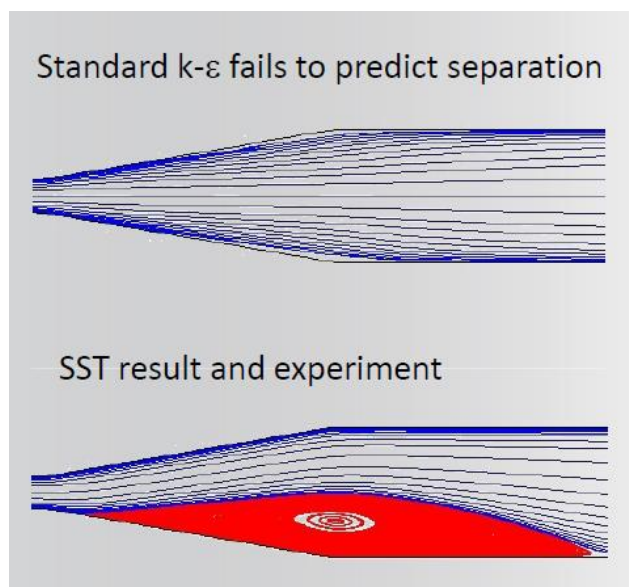


Figura 4.11 Simulació desprendiment capa límit segons models *k-ε* i SST



5. Model numèric CFD

5.1. Creació de la geometria

El primer pas de tota simulació és la creació de la geometria. Aquesta consisteix en definir l'àrea que envolta el perfil del cos, per a poder estudiar quins efectes provoca la coberta sobre el flux del fluid extern incident sobre ella (aire, vent). Aquesta superfície s'anomena domini i tot element objecte d'estudi s'ha de trobar al seu interior. Per al disseny de la geometria, s'utilitzen programes CAD, com ara *SolidWorks* o *PTC Creo Elements*, i després s'importen al *Workbench* de l'ANSYS CFX. Tot i això, el propi ANSYS incorpora un subprograma per a modelar geometries que no s'ha utilitzat.

En aquest estudi el disseny es va fer amb *SolidWorks*. A continuació s'adjunta un plànol (*Figura 5.1*) amb les cotes.

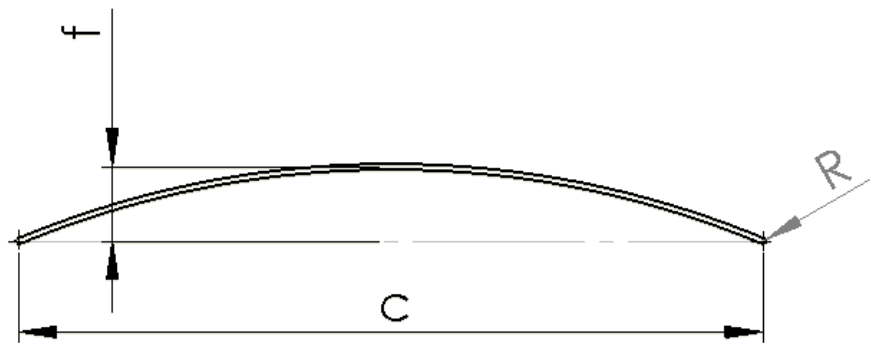


Figura 5.1 Plànol coberta simple

On:

C (corda) = 13 m

R (radi/gruix) = 0,05 m

f (fletxa) = 1,3 m

El valor de la corda de l'arc (o distància entre punts de suport) i el gruix són els mateixos per a tot l'estudi. El primer es va fixar d'acord amb l'estàndard d'aquest tipus de sostres per a pistes de pàdel i el segon per a simplificar la geometria de la xapa que conforma la coberta

sencera. La fletxa de l'arc, f , és el paràmetre que es vol modificar per tal de determinar-ne els seus efectes.

Es coneix que el valor que pren f es mou típicament entre $c/10$ i $c/4$, on c és la corda de l'arc. Per a una primera simulació, s'agafa el valor de 1,3 m, corresponent a $c/10$. Posteriorment s'escullen una sèrie de valors dins de l'interval mencionat corresponents a $c/8$ (1,6 m), $c/6$ (2,15 m) i $c/4$ (3,25 m), per a poder veure com varien les accions aerodinàmiques en funció de la seva variació.

Aquest estudi és una simulació en 2D, però el programari no permet realitzar simulacions hidrodinàmiques sobre una única superfície. És per això que s'ha fixat una fondària simbòlica de 0,2 m.

El domini és rectangular de dimensions 15,3 x 87,5 m². La coberta es troba a 12,25 m de l'extrem esquerra del domini i a 7 m del terra. Així es garanteix deixar un espai prou gran a la part del darrere per a poder reproduir de forma fidel i precisa el possible deixant.

Tot el perímetre de la coberta és un contorn suavitzat, és a dir, no presenta cap aresta ni canvi de geometria brusc. Això facilitarà el mallat del domini.

5.2. Creació de la malla

Un cop definida la geometria, cal definir el mallat pel domini de l'estudi. És el pas més crític, doncs els resultats depenen en gran part de la qualitat de la malla que s'hagi implementat. Una malla amb elements grans donarà resultats poc acurats i, per tant, errors importants. En canvi, una malla amb elements més petits proporcionarà una solució més precisa, a canvi d'un temps de càlcul molt més gran. Cal tenir present que, amb una malla molt fina hi poden haver problemes de convergència del resultats i no arribar-se a obtenir una solució.

La dificultat del procés de mallat resideix en trobar la malla òptima, amb el menor nombre d'elements, que permeti obtenir resultats precisos. Es per això que es procura garantir elements més fins al voltant del perfil de la coberta, deixant sense refinar les zones del domini de menor interès on els gradients de les propietats són menors. Per aconseguir això, s'apliquen els següents mètodes de mallat sobre el domini que com ja s'ha comentat anteriorment té un petit gruix:

- *Sweep method*, que fa un escombrat amb un element amb la dimensió del gruix del domini.



- *Edge sizing* per forçar les dimensions dels elements en el perímetre del domini. Aquest mètode també s'aplica a tot el perfil de la coberta, perquè és la zona més rellevant en l'estudi, i on s'ha de fer un refinat més acurat.

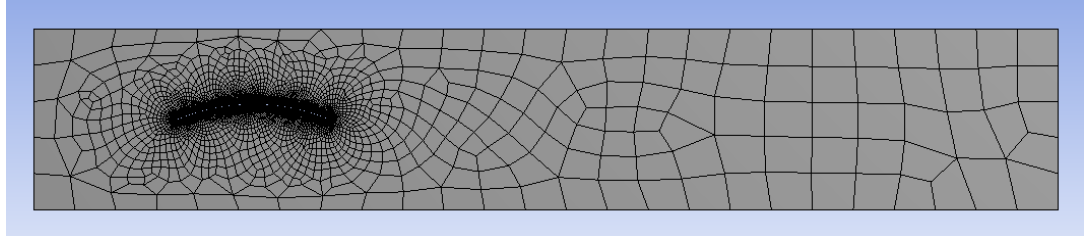


Figura 5.2 Domini mallat

- *Inflation* al voltant del perfil de la coberta que consisteix en afegir elements molt petits en la zona de la capa límit propera a la paret i així poder calcular amb més precisió les tensions viscoses i el comportament de la capa límit. Aquest mètode fa un mallat per capes, on va augmentant de forma progressiva la grandària dels elements de cadascuna, anant dels més petits que es troben en contacte amb la paret als més grans a mida que ens allunyem de la paret.

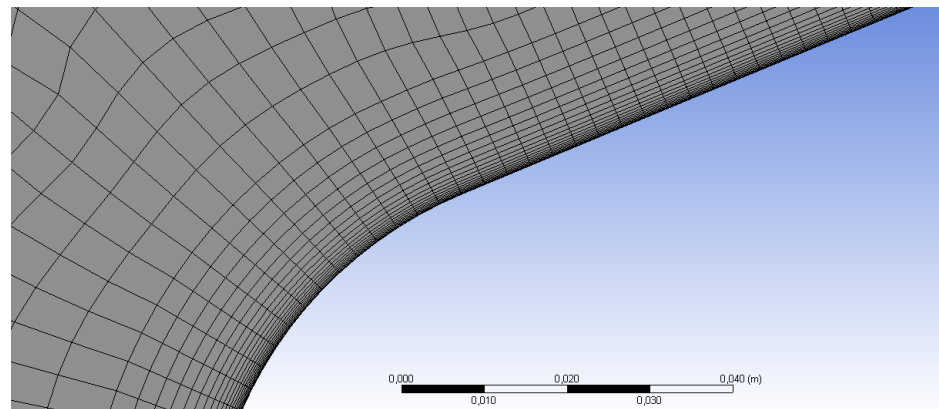
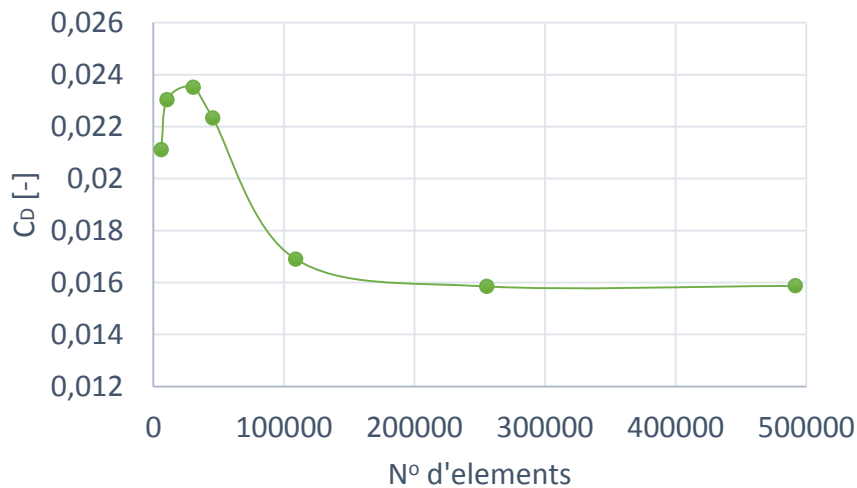
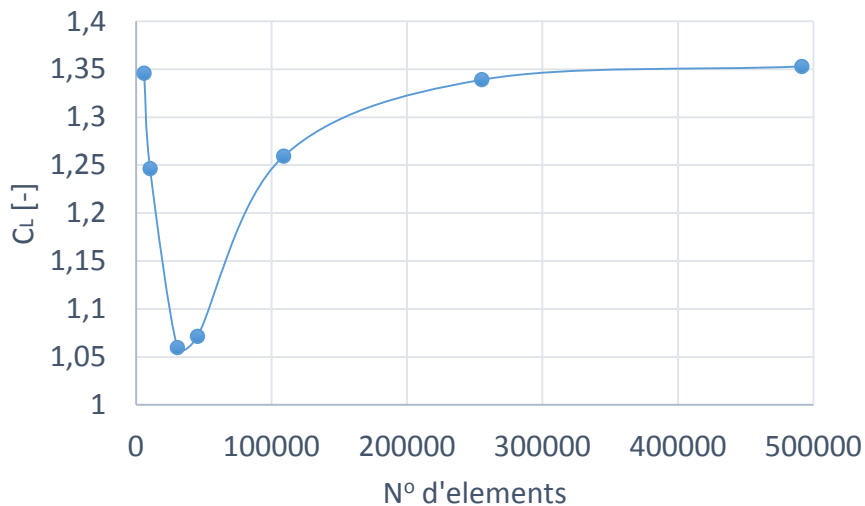


Figura 5.3 Detall del Inflation

Un cop establertes aquestes condicions, es prossegueix a fer un estudi per a identificar la malla òptima en quant a elements. Aquest es fa calibrant les longituds dels elements i el seu nombre de forma seqüencial. Es parteix d'una malla de grans elements i es va refinant fins a obtenir resultats invariables dels coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació. A continuació es mostren el *Gràfic 5.1* i el *Gràfic 5.2* on s'aprecia l'influència del tipus de malla sobre els resultats, graficant els coeficients mencionats en funció del nombre d'elements de la malla.



Gràfic 5.1 Coeficient de resistència a l'avanç en funció del nombre d'elements de la malla



Gràfic 5.2 Coeficient de sustentació en funció del nombre d'elements de la malla

Es pot observar que a partir del 250.000 elements la malla no millora la precisió dels resultats. Per tant, la malla seleccionada consta de 255.306 elements.

Dins també de l'Ansys Meshing, s'anomenen les superfícies de contorn per a l'estudi amb l'eina *Create Names Selections*. Aquestes faciliten la feina en el moment d'aplicar les condicions de contorn al *Setup* i en la visualització dels resultats en el *CFD-Post*.

Un cop s'ha obtingut el mallat òptim, es pot realitzar la simulació amb CFX. Tot els passos



que es detallen en els apartats 5.3. *Models de simulació* i 5.4. *Condicions de contorn i càlcul de la solució* es duen a terme dins del *Setup* del programa.

5.3. Models de simulació

És important i de gran ajuda entendre com soluciona el problema el programari CFX. Per aquest motiu, en aquest apartat s'expliquen totes les equacions, balanços, aproximacions, etc, que resol l'Ansys per arribar a la solució final.

Primerament es fixen el tipus de fluid (aire) i la pressió de referència (atmosfèrica). També s'escull un model de simulació sense transferència de calor (isoterm) i amb turbulència (*Shear Stress Transport*).

5.3.1. Transferència de calor

Pel que fa a la transferència de calor d'aquest estudi, el model de simulació que s'ha utilitzat al CFX menysprea els efectes tèrmics, per això es selecciona la opció d'**isoterm** que imposa una temperatura constant.

5.3.2. Turbulència a prop les parets

La zona de més interès per a l'estudi és a prop de les parets dins de la capa límit. És per això que s'ha de tenir especial cura en comprovar que s'ha fet una bona simulació a les capes més properes a la coberta.

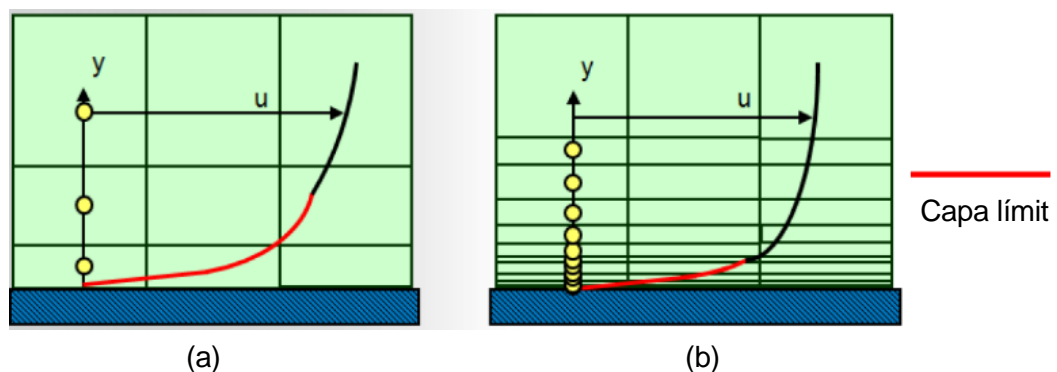


Figura 5.4 Perfil de velocitats a la capa límit: (a) sense wall function i (b) amb Wall function

L'opció *wall functions* permet inferir el perfil de velocitats que hi ha proper a la paret sense la necessitat d'utilitzar la Llei Universal de la paret per a la turbulència (Figura 5.4). Amb aquesta opció, no es necessari un refinat molt elevat en la zona de la capa límit. El model SST utilitza aquesta opció.

El Gràfic 5.3 mostra la velocitat adimensional, u^+ (eq. 5.1) en funció de la distància des de la

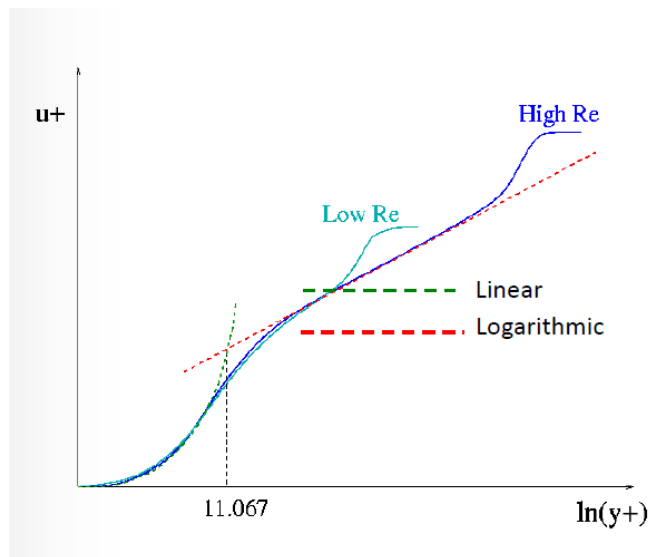
paret adimensional, y^+ o **Yplus** (eq. 5.2). S'observa que a prop la paret la velocitat canvia ràpidament.

$$u^+ = \frac{u}{\sqrt{\frac{\tau_{paret}}{\rho}}}$$

eq. 5.1

$$y^+ = \frac{y \sqrt{\frac{\tau_{paret}}{\rho}}}{\nu}$$

eq. 5.2



Gràfic 5.3 Velocitat en funció de la distància des de la paret

Per a comprovar el nivell de refinament de malla dins de la capa límit es pot representar el valor de la y^+ que ens indica la distància a la paret del primer vèrtex de l'element adjacent a la mateixa. Normalment, quan s'utilitza la opció wall functions, el y^+ es recomana que com a mínim es trobi entre 20 i 200.

5.4. Condicions de contorn i càlcul de la solució

Les condicions de contorn del domini s'apliquen a les Named Selections que s'han creat anteriorment. Com es pot veure en la Figura 5.5, es determinen les zones d'entrada i sortida del flux, *Inlet* i *Outlet* respectivament. S'ha pres 29 m/s com a valor de la velocitat del vent



aplicada en la direcció normal de la cara lateral del domini. Aquest valor correspon a la velocitat bàsica del vent que la normativa *CTE DB SE-AE* [1][14] estipula com a velocitat mitjana a la regió de Catalunya on s'instal·laran les cobertes.

La pressió a la sortida és l'atmosfèrica. També es mostren les zones on s'ha aplicat la condició de contorn de *Wall*. Aquestes són el terra, *Ground*, i les parets que conformen el perfil de la coberta, *Roof*. A més a més, s'ha aplicat la condició de simetria, *Symmetry*, a les dues cares laterals i la superior del domini.

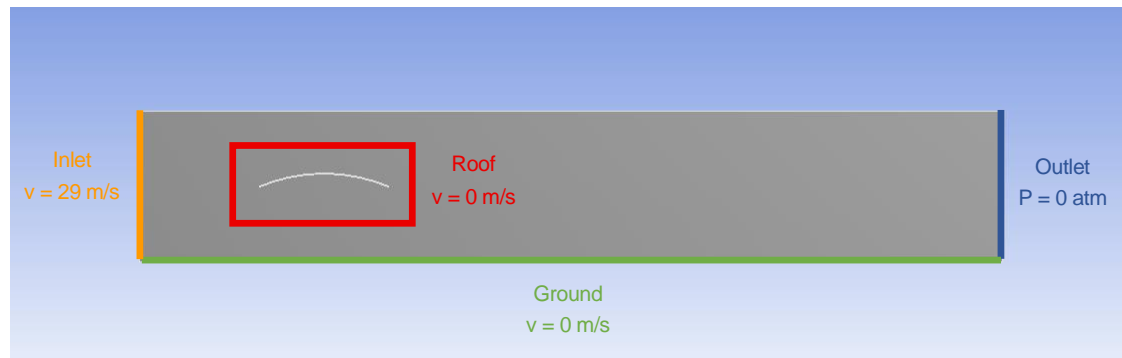


Figura 5.5 Condicions de contorn aplicades al domini

Finalment, s'estableixen els paràmetres que es volen monitoritzar durant el càlcul i estudiar el seus valors. Aquests són els coeficients de resistència a l'avanç i sustentació, definits a l'*Ansyst* amb les següents expressions respectivament:

$$\frac{force_x()@Roof * 2}{(massFlowAve(Density)@Inlet * (massFlowAve(Velocity)@Inlet)^2 * 13[m] * 0.2[m])}$$

$$\frac{force_y()@Roof * 2}{(massFlowAve(Density)@Inlet * (massFlowAve(Velocity)@Inlet)^2 * 13[m] * 0.2[m])}$$

on:

$force_x()@Roof$ és la força aplicada sobre la superfície del perfil en direcció x.

$force_y()@Roof$ és la força aplicada sobre la superfície del perfil en direcció y.

$massFlowAve(Density)@Inlet$ és la densitat de l'aire que incideix sobre el domini.

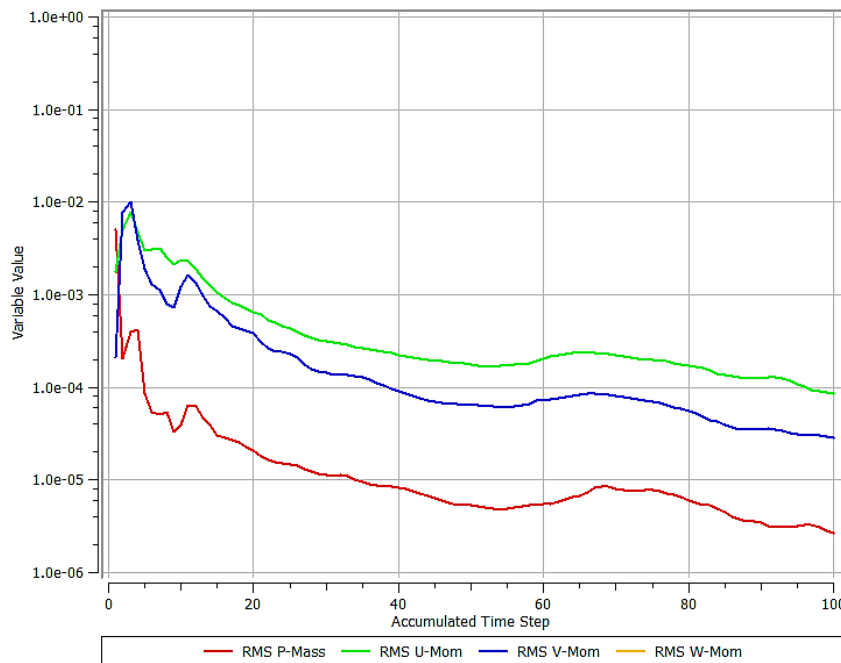
$massFlowAve(Velocity)@Inlet$ és la velocitat de l'aire que incideix sobre el domini.

$13[m] * 0.2[m]$ és l'àrea en planta (A_P) en m^2 .

L'últim pas abans d'iniciar la simulació és fixar el nombre d'iteracions que resoldrà la

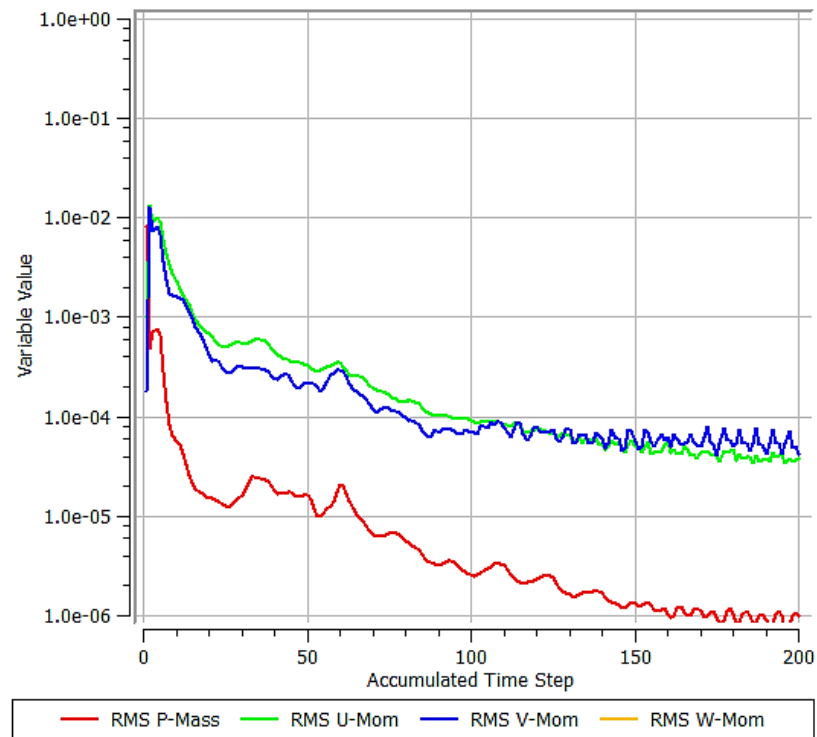
computadora. Per aquest projecte està comprés entre un mínim de 100 iteracions i un màxim de 200.

Durant la solució es visualitzen els gràfics dels residus per controlar la convergència. La solució finalitza o bé quan els valors dels residus (diferència entre el valor de la iteració anterior i l'actual) és inferior a $1e-4$ o bé quan s'assoleix el número màxim d'iteracions fixat (*Gràfic 5.4*). Si al arribar a les 200 iteracions, el valor d'algun dels residus es superior a $1e-4$ i la tendència de la gràfica és anar cada vegada a valors més petits, cal tornar a iterar o incrementar el número màxim d'iteracions, per així garantir que la solució convergeixi. En cas que la solució hagi convergit però els residus oscil·lin sobre un mateix valor, cal seleccionar un valor de *timescale* inferior que faci més lenta la simulació i estabilitzi els residus, doncs pot ser que la solució no hagi assolit un valor estable a causa, per exemple, de la formació de grans turbulències (*Gràfic 5.5*). Si la solució no convergeix, cal revisar el mallat o les condicions de contorn aplicades (*Gràfic 5.6*).

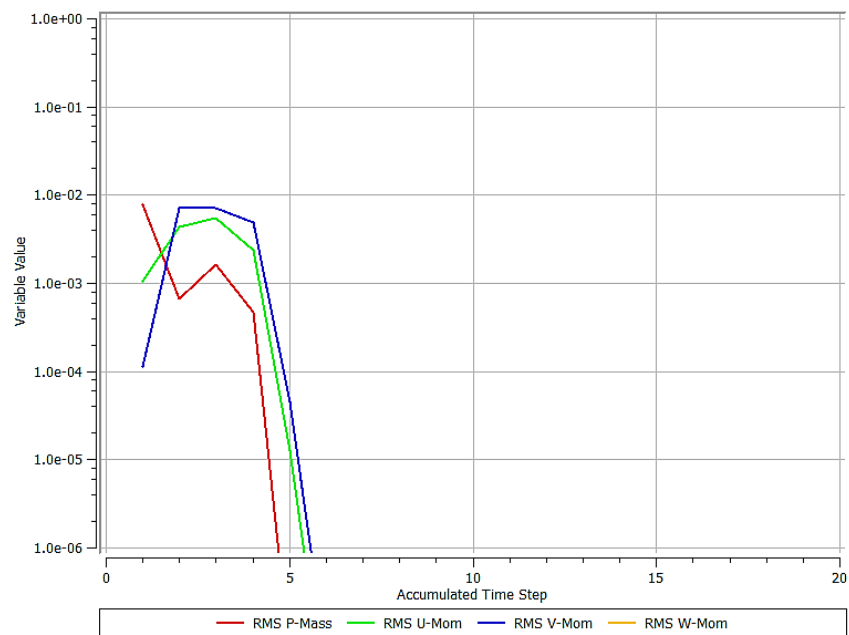


Gràfic 5.4 Residus en que la solució convergeix





Gràfic 5.5 Residus en que la solució oscil·la sobre un valor



Gràfic 5.6 Residus en que la solució no convergeix

Un cop la simulació ha convergint a una solució final, l'eina *Post-procés* permet obtenir el valor resultant de les expressions que s'havien definit i representar les variables d'interès.

Per a poder conèixer els valors que pren el coeficient de pressió al llarg de tot el perfil de la coberta de l'estudi, es crea a la plataforma *CFD Post* de l'*Ansys* una nova variable definida amb la següent expressió.

$$C_p = \text{Pressure} / (0.5 * \text{massFlowAve}(\text{Density}) @ \text{Inlet} * (\text{massFlowAve}(\text{Velocity}) @ \text{Inlet})^2)$$

On:

Pressure és la variable pressió.

massFlowAve(Density) @Inlet és la densitat de l'aire que incideix sobre el domini.

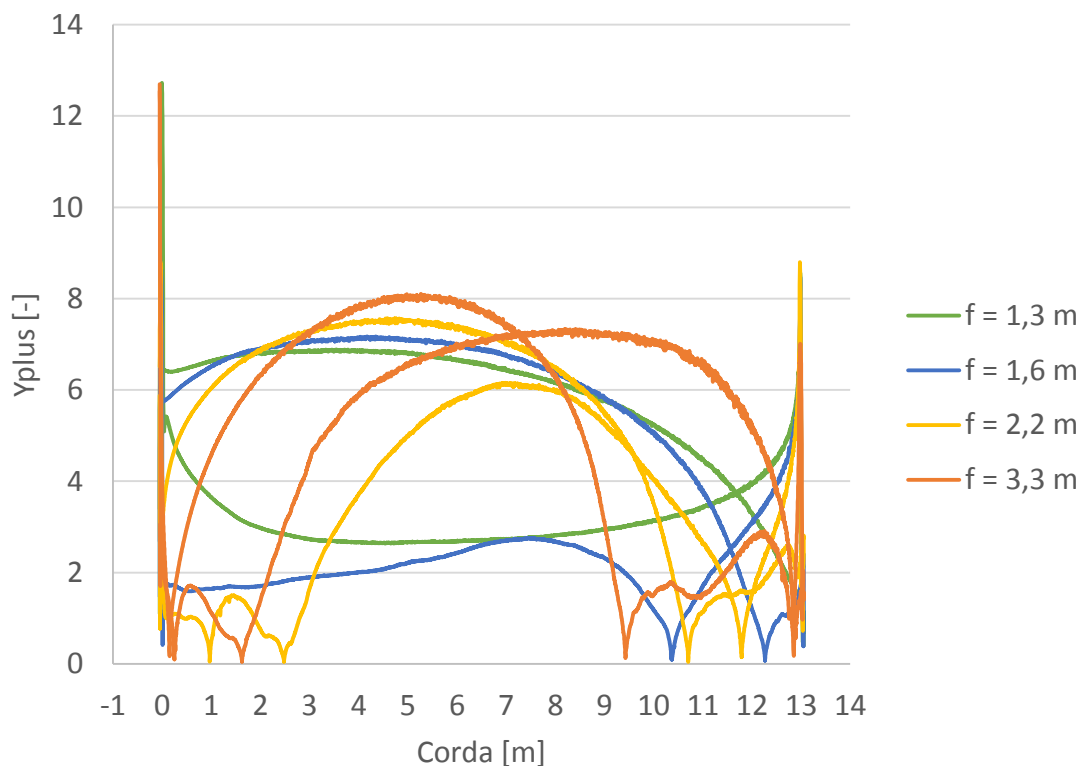
massFlowAve(Velocity) @Inlet és la velocitat de l'aire que incideix sobre el domini.



6. Simulacions coberta simple

6.1. Comprovació de la malla, y^+

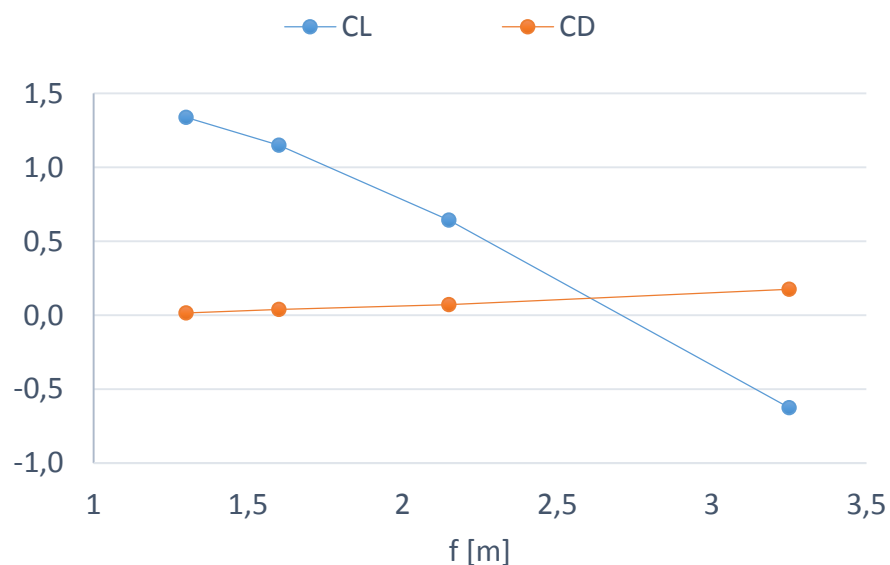
El primer pas de tots, abans d'analitzar els resultats, és comprovar que s'ha fet un bon mallat i un bon refinat a les capes més properes a la superfície. Al *Gràfic 6.1* s'observen els valors de y^+ en funció de la corda, per cada fletxa d'arc. Els valors màxims es mouen entre 6 i 8. Com aquests màxims són inferiors a 20, es corrobora que el mallat i el refinat són correctes pel model de turbulència que es vol emprar i, per tant, la capa límit al voltant de la coberta s'hauria de resoldre correctament.



Gràfic 6.1 Yplus en funció de la corda per a cada valor de fletxa

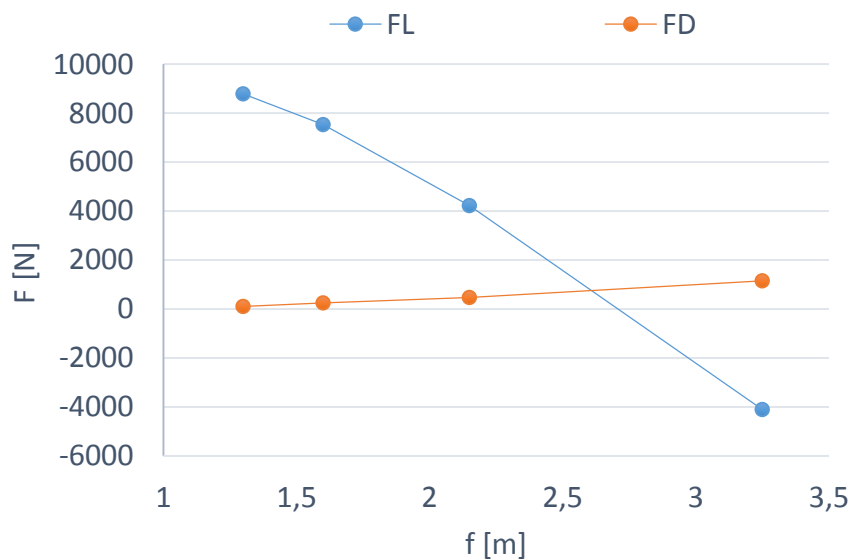
6.2. Coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació

Primerament, s'observen els valors finals dels coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació. En el *Gràfic 6.2* es mostra la seva evolució en funció de la fletxa.



Gràfic 6.2 Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la fletxa

D'aquests coeficients, s'obtenen les forces de resistència a l'avanç i sustentació per metre d'amplada. Al Gràfic 6.3 es mostra l'evolució d'aquestes dues forces. Els valors del Gràfic 6.3 són els que corresponents a 1 m d'amplada.



Gràfic 6.3 Forces de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la fletxa



El coeficient de resistència a l'avanç augmenta lleugerament a mida que s'incrementa la fletxa de l'arc. En canvi, a mesura que s'augmenta la corbatura de la coberta, el coeficient de sustentació tendeix a disminuir significativament fins a arribar a valors negatius per la fletxa màxima.

A partir dels resultats es pot inferir que la força de sustentació és nul·la aproximadament al valor de $f = 2,7$ m. A partir d'aquest valor, apareix una força de sustentació negativa, és a dir, en la mateixa direcció que la gravetat.

6.3. Distribució de velocitats i pressions

Un cop analitzats aquests valors, es representen les accions aerodinàmiques que transcorren sobre la coberta en cadascun dels casos. S'il·lustren la distribució de velocitats i pressions al voltant del perfil. També les línies de corrent i un detall de la distribució de velocitats una zona d'interès del perfil.

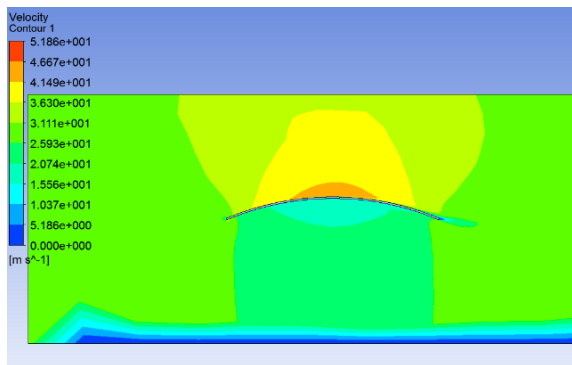


Figura 6.1 Distribució de velocitats
 $f = 1,3$ m

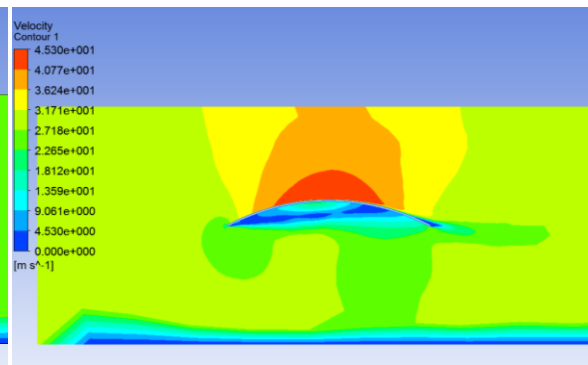


Figura 6.2 Distribució de velocitats
 $f = 1,6$ m

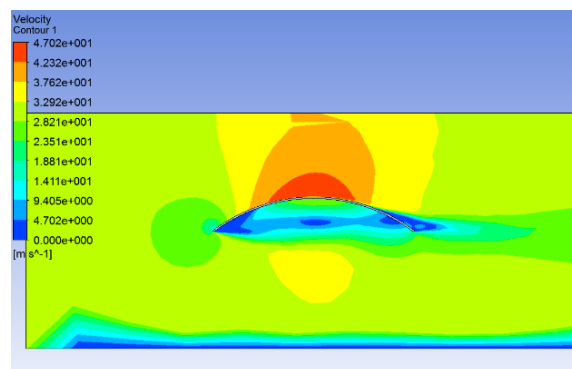


Figura 6.3 Distribució de velocitats
 $f = 2,15$ m

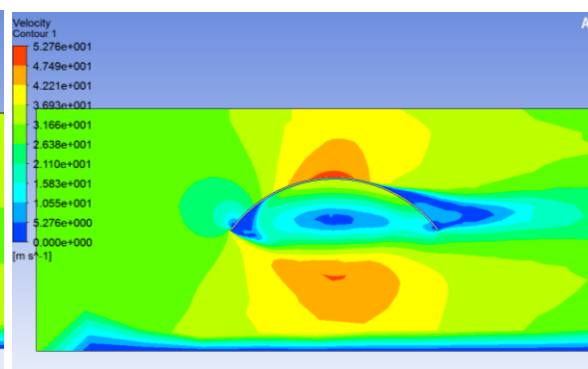


Figura 6.4 Distribució de velocitats
 $f = 3,25$ m

La distribució de velocitats depèn notablement del valor que pren la fletxa de l'arc. Cal diferenciar el comportament d'aquestes velocitats en la superfície superior de la inferior.

En la cara superior de la coberta, es pot observar que la velocitat màxima que s'assoleix varia entre 45 i 53 m/s. Sí que hi ha importants diferències entre cada cas si ens fixem en el despreniment de la capa límit. Quan l'arc de la fletxa pren el valor de 1,3 m (*Figura 6.1*), no s'observa aquest fenomen. És a dir, la velocitat va disminuint tot augmentant la pressió però no arriba a fer-se nul·la en cap punt. En els casos en que la fletxa val 1,6 i 2,15 m (*Figura 6.2* i *Figura 6.3*) ja es produeix despreniment de la capa límit gairebé al final del perfil que genera un deixant, tot i ser poc perceptible. L'estela és més notable en l'últim cas de tots, on es pot observar amb claredat la gran superfície que ocupa (*Figura 6.4*). Ens els últims tres casos, aquest despreniment es produeix quan, un cop assolida la velocitat màxima, aquesta va disminuint fins a fer-se nul·la. En aquest punt es produeix el despreniment.

En canvi, la variació en la distribució de velocitats és molt més notable en la superfície inferior de la coberta. Considerem el primer cas com a referència (*Figura 6.1*), on la velocitat, després d'augmentar, disminueix sense arribar a fer-se nul·la i, per tant, el perfil de velocitats no presenta cap canvi de direcció. En canvi, en els altres tres casos es produeix despreniment de la capa límit. Notar que quan l'arc de la fletxa pren el valor de 1,6 i 2,15 m (*Figura 6.2* i *Figura 6.3*), s'observen perfils de velocitats en què el fluid més proper a la superfícies de la coberta canvia el seu sentit formant diversos remolins dins de l'estela. L'últim cas és el que genera una velocitat màxima més elevada i un gran remolí central sota la coberta (*Figura 6.4*). Cal recordar que en aquest cas el valor del coeficient de sustentació és negatiu.

Cal destacar també que en els dos últims casos es veu clarament com a la part del davant hi ha un punt on la velocitat és nul·la: correspon al punt d'estancament., tot i estar aquest present en totes les diferents situacions.



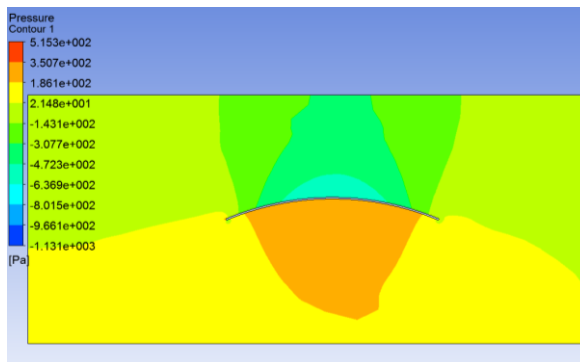


Figura 6.5 Distribució de pressions
 $f = 1,3 \text{ m}$

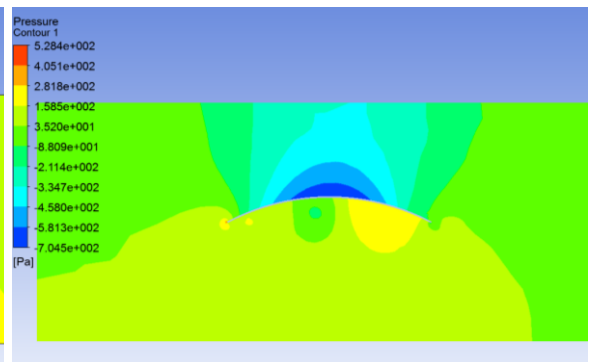


Figura 6.6 Distribució de pressions
 $f = 1,6 \text{ m}$

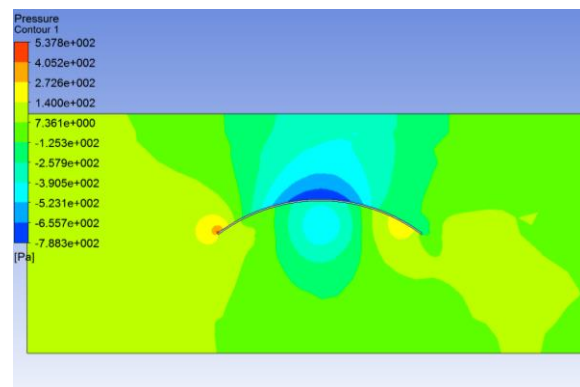


Figura 6.7 Distribució de pressions
 $f = 2,15 \text{ m}$

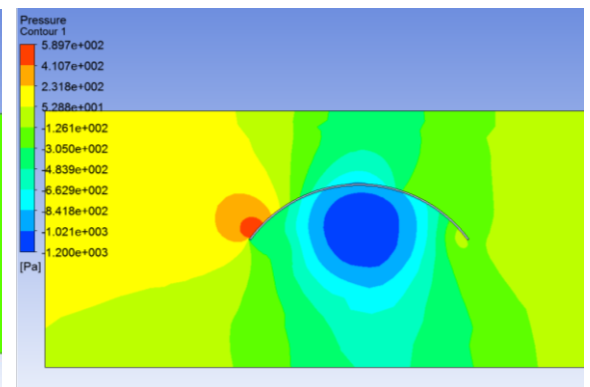


Figura 6.8 Distribució de pressions
 $f = 3,25 \text{ m}$

De forma anàloga a les velocitats, la distribució de pressions varia també notablement en funció del valor de la fletxa de l'arc de la coberta. Observar que la zona de màxima pressió correspon al punt d'estancament, ja que en aquest punt la velocitat és nul·la i per tant la pressió màxima. De la *Figura 6.4* a la *Figura 6.8* s'observa el valor d'aquesta pressió màxima, que va augmentat de manera poc significativa a mesura que augmenta el valor de la fletxa. De forma anàloga, en els punts on la velocitat és màxima, la pressió és mínima. Això s'observa amb claredat en els tres primers casos, en la zona central de la coberta superior.

Cal destacar el comportament de l'últim cas (*Figura 6.8*), on hi ha una gran deixant amb molt baixa pressió.

A continuació, de la *Figura 6.9* a la *Figura 6.12* s'observen les línies de corrent que envolten el perfil de la coberta i mostren el comportament del flux entorn a l'objecte d'estudi amb forts remolins de vent.

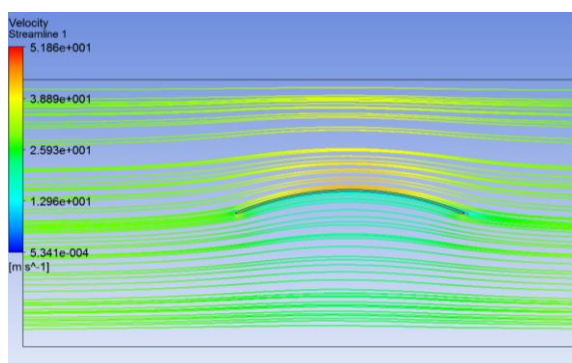


Figura 6.9 Línies de corrent
 $f = 1,3 \text{ m}$

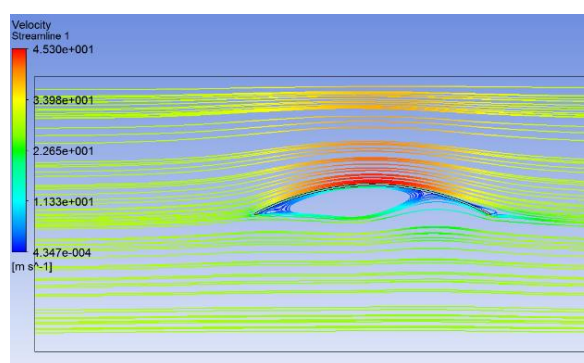


Figura 6.10 Línies de corrents
 $f = 1,6 \text{ m}$

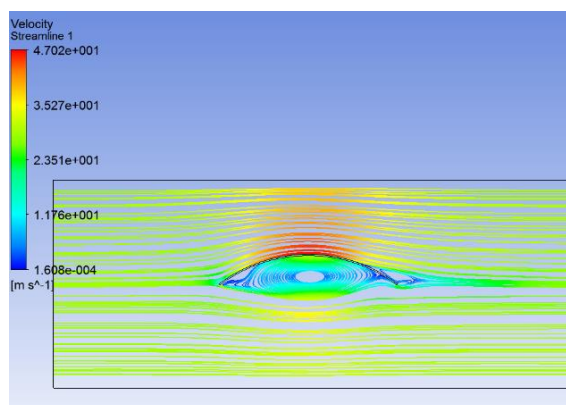


Figura 6.11 Línies de corrent
 $f = 2,15 \text{ m}$

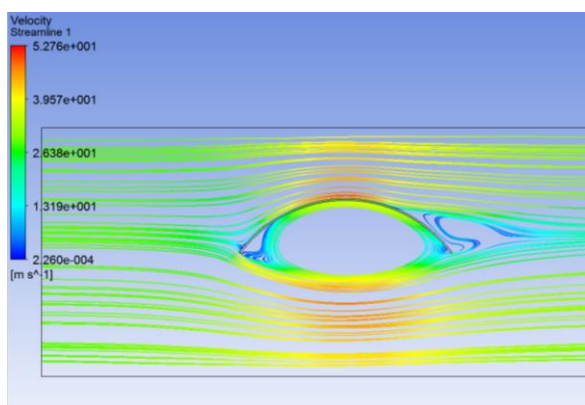


Figura 6.12 Línies de corrent
 $f = 3,25 \text{ m}$

De la *Figura 6.13* a la *Figura 6.16* es mostra el perfil de velocitat que apareix en cada cas just al punt mig de la coberta. S'aprecia amb més detall el canvi en la direcció de la velocitat degut al desprendiment de la capa límit, que s'ha comentat anteriorment. En el cas en que f pren el valor de 3,25 m, s'observa en detall comportament la gran vorticitat en tota la zona turbulenta.



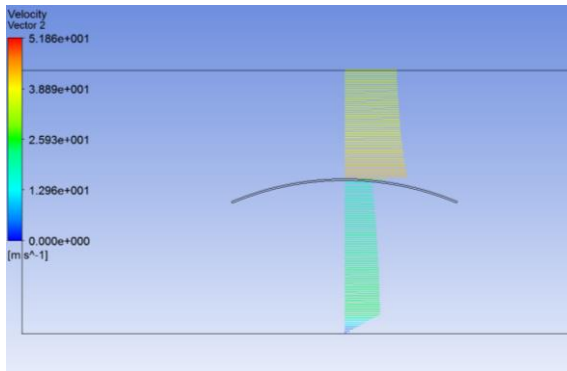


Figura 6.13 Detall perfil de velocitats
 $f = 1,3 \text{ m}$

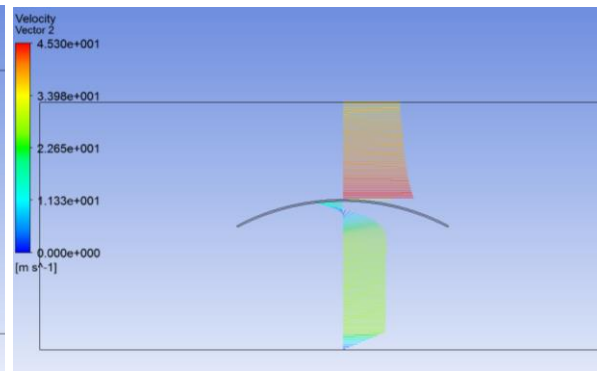


Figura 6.14 Detall perfil de velocitats
 $f = 1,6 \text{ m}$

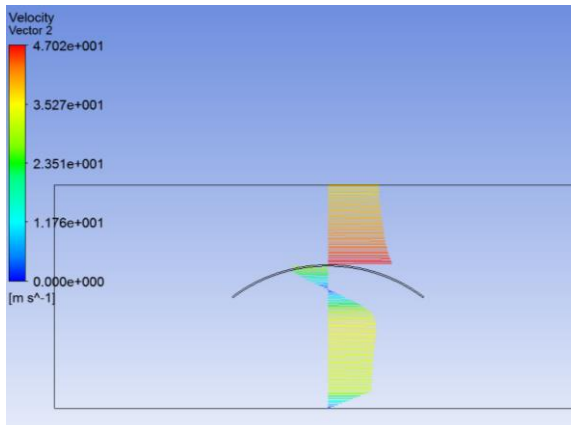


Figura 6.15 Detall perfil de velocitats
 $f = 2,15 \text{ m}$

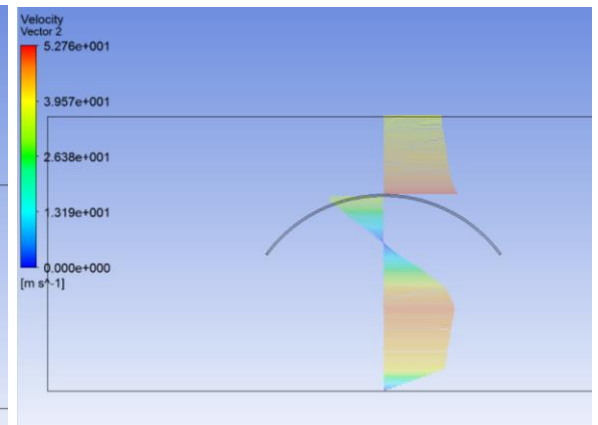
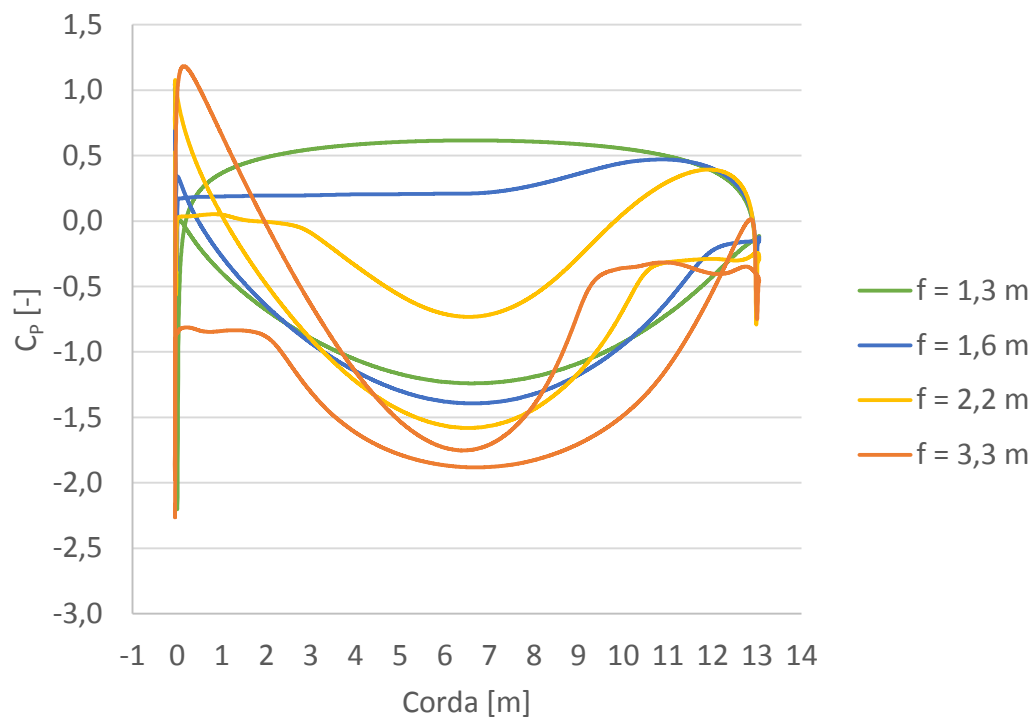


Figura 6.16 Detall perfil de velocitats
 $f = 3,25 \text{ m}$

6.4. Coeficient de pressió

Al *CFD Post* s'obté la pressió a cadascun dels punts que conformen la coberta. Això permet determinar els coeficients de pressió localitzats al llarg de tot el perfil, tant a la part superior com a la interior. Amb les dades obtingudes, es genera el *Gràfic 6.4*, que permet entendre millor les accions aerodinàmiques a les que se sotmet la coberta i, a més a més, permet fer una comparació precisa entre les quatre variants d'aquest estudi.



Gràfic 6.4 Coeficients de pressió en la coberta simple

El Gràfic 6.4 mostra el valor del C_p tant de la superfície superior de la coberta com la inferior en cada cas. S'observa que aquest coeficient varia notablement en funció del valor que pren f .

Per a poder fer un anàlisi més entenedor, s'ha realitzat els diagrames de la Figura 6.17. S'observa com varia la distribució de les pressions sobre les cares superior i inferior de la coberta. És important destacar com les pressions a la cara inferior de la coberta van disminuint a mesura que augmenta f fins a arribar-se a fer negatives. Observar que quan la f és màxima la resultant de la distribució de pressions pren el sentit negatiu de l'eix de les y . Tot això i la generació del gran remolí a la part inferior de la coberta expliquen el canvi de signe de la força de sustentació.



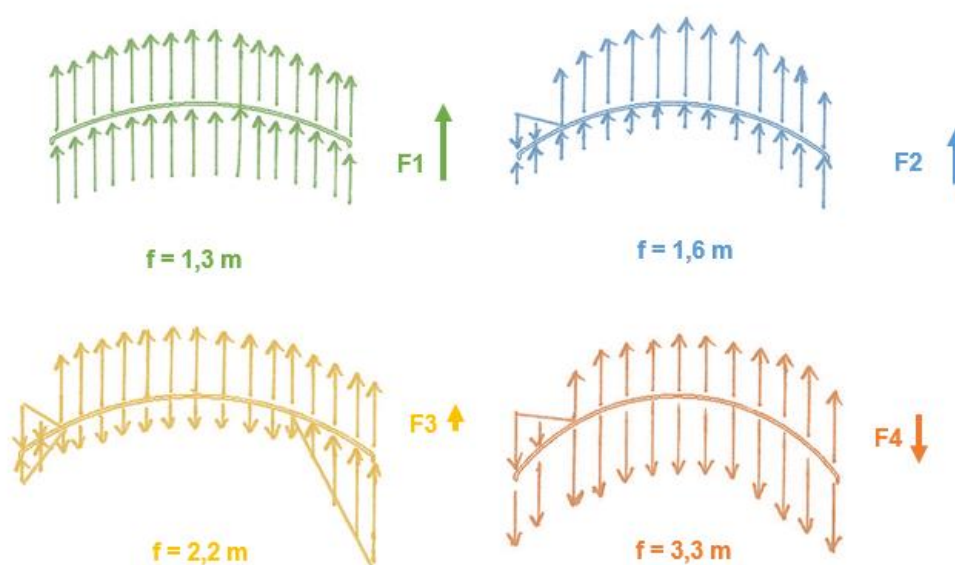


Figura 6.17 Diagrames distribució de pressions

7. Simulacions coberta amb biga

7.1. Modificacions prèvies

Al realitzar l'estudi comparatiu de quatre casos tot variant la f , s'ha observat com aquesta variació influeix sobre les accions aerodinàmiques. Seguidament es torna a fer l'estudi aproximant més el disseny de la coberta a la realitat: s'afegeixen les bigues de suport, davant i darrere, on es recolzarà la coberta.

Per aquest tipus d'instal·lacions, s'utilitza la biga del tipus HEB, ja que és un perfil que treballa molt bé tant a flexió com a compressió. Les dimensions de la biga són HEB 200, és a dir, del plànol de la *Figura 7.1*, l'alçada $h = 200$ mm. Per a poder-ho simular, es simplifica aquest perfil tal com es mostra en el plànol de la *Figura 7.2*.

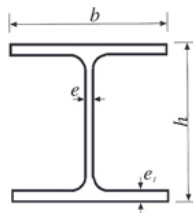


Figura 7.1 Plànol biga HEB

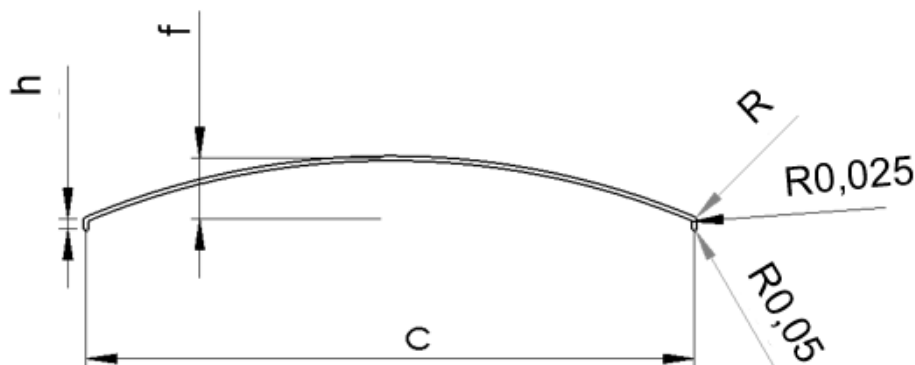


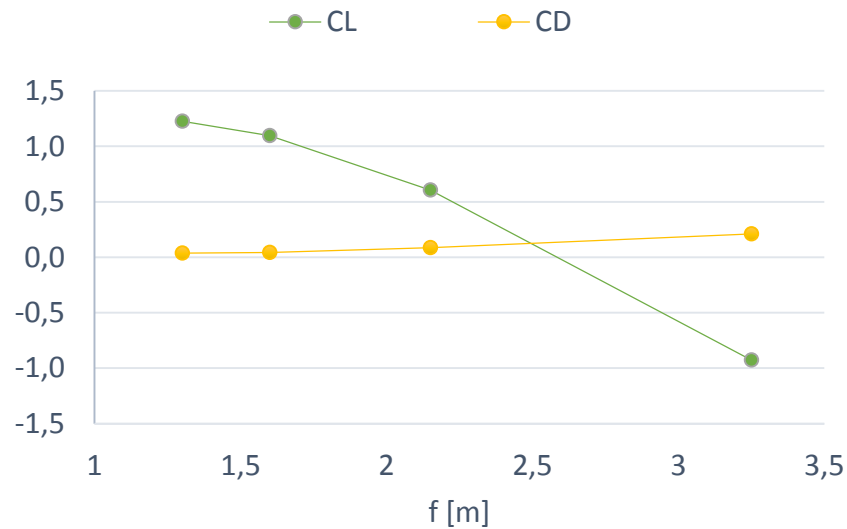
Figura 7.2 Plànol coberta amb biga [m]

Es torna a fer l'estudi de l'apartat 6.1. *Variació de la fletxa de l'arc* amb el nou disseny. Es compararà quatre casos, com anteriorment, els corresponents a f igual a 1,3 m, 1,6 m, 2,15 m i 3,25 m.



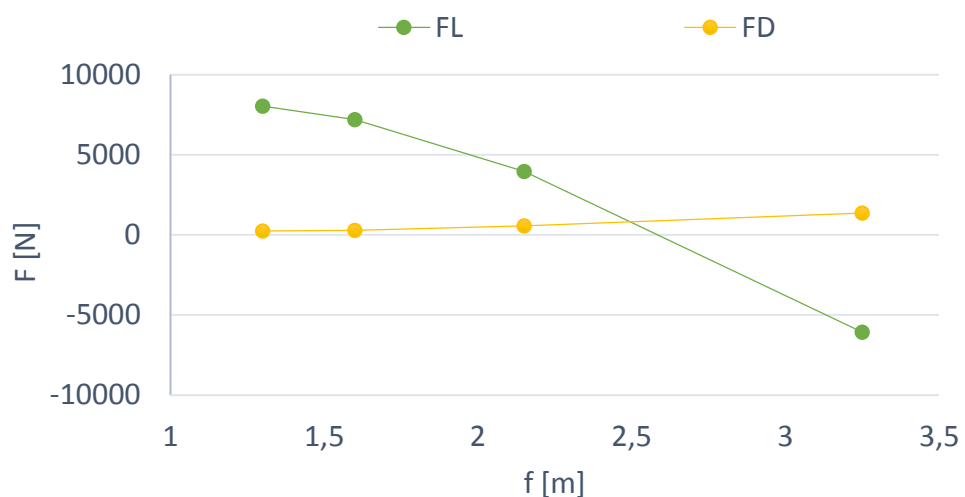
7.2. Coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació

S'observen els valors finals dels coeficients de resistència a l'avanç i sustentació. En el Gràfic 7.1 es mostra l'evolució dels valors d'ambdós paràmetres en funció de la fletxa.



Gràfic 7.1 Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la fletxa

D'aquests coeficients, s'obtenen les forces de resistència a l'avanç i sustentació per metre d'amplada. Al Gràfic 7.2 es mostra l'evolució d'aquestes dues forces. Els valors del gràfic són els que corresponents a 1 m d'amplada.



Gràfic 7.2 Forces de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la fletxa

7.3. Distribució de velocitats i pressions

Un cop analitzats aquests valors, es representen les accions aerodinàmiques que transcorren sobre la coberta en cadascun dels casos. S'il·lustren la distribució de velocitats i pressions al voltant del perfil. També les línies de corrent i un detall d'aquestes sobre una zona d'interès del perfil.

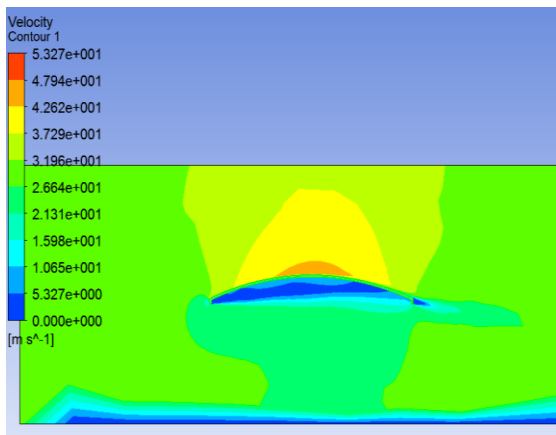


Figura 7.3 Distribució de velocitats
 $f = 1,3 \text{ m}$

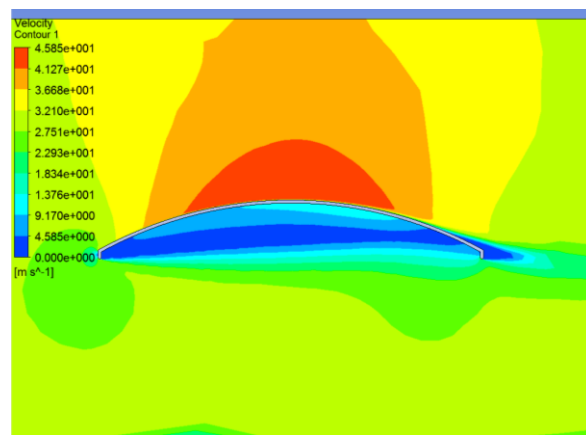


Figura 7.4 Distribució de velocitats
 $f = 1,6 \text{ m}$

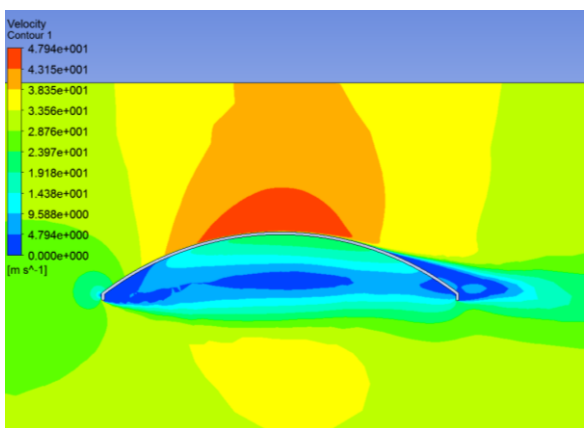


Figura 7.5 Distribució de velocitats
 $f = 2,15 \text{ m}$

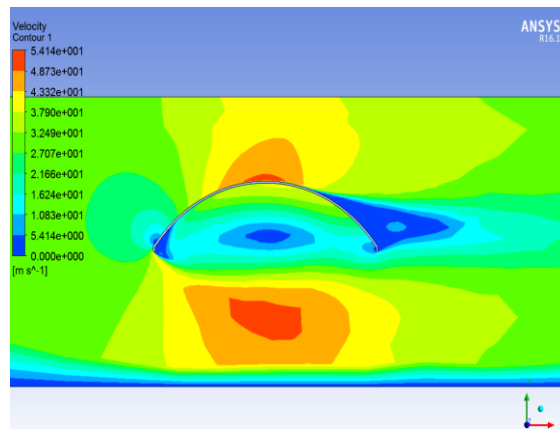


Figura 7.6 Distribució de velocitats
 $f = 3,25 \text{ m}$

La distribució de velocitats depèn notablement del valor que pren f . Cal diferenciar el comportament d'aquestes velocitats en la superfície superior de la inferior.

En la cara superior, s'observa un comportament similar al del cas inicial sense biga de suport.



La velocitat màxima que s'assoleix a la part més elevada de la coberta es manté entre 45 i 55 m/s. En quan al despreniment de la capa límit, per una fletxa de 1,3 m (*Figura 7.3*), no n'hi ha i es produeix per valors superior de fletxa. A f més gran, major és el deixant generat a la part posterior de la coberta (*Figura 7.4*, *Figura 7.5* i *Figura 7.6*).

En canvi, la variació en la distribució de velocitats és molt més notable en la superfície inferior de la coberta. Al introduir la biga de suport, es produeix despreniment de la capa límit en totes les situacions i els deixants són de majors dimensions que sense la biga. Quan f val 1,3 m (*Figura 7.3*) la velocitat en gairebé tots els punts més propers al perfil és baixa. Notar que quan l'arc de la fletxa pren el valor de 1,6 i 2,15 m (*Figura 7.4* i *Figura 7.5*) s'observen perfils de velocitats en què el fluid més proper a la superfícies de la coberta canvia el sentit formant diversos remolins. L'últim cas és el que genera una velocitat màxima més elevada i unes zones turbulentes més notables (*Figura 7.6*), tant sota la coberta com en la part del deixant. Cal recordar que en aquest cas el valor del coeficient de sustentació és negatiu.

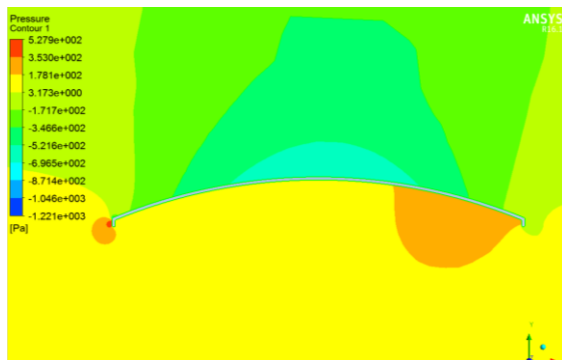


Figura 7.7 Distribució de pressions
 $f = 1,3$ m

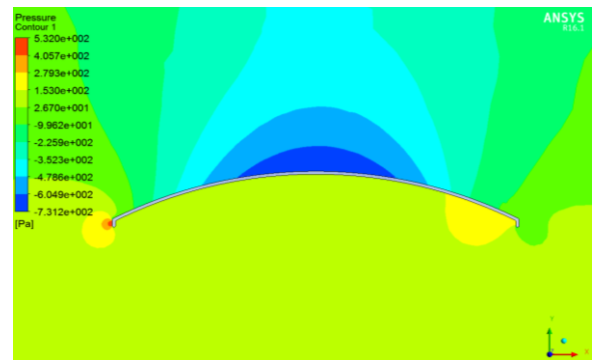


Figura 7.8 Distribució de pressions
 $f = 1,6$ m

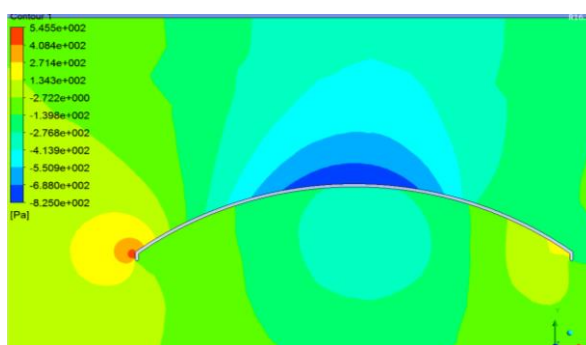


Figura 7.9 Distribució de pressions
 $f = 2,15$ m

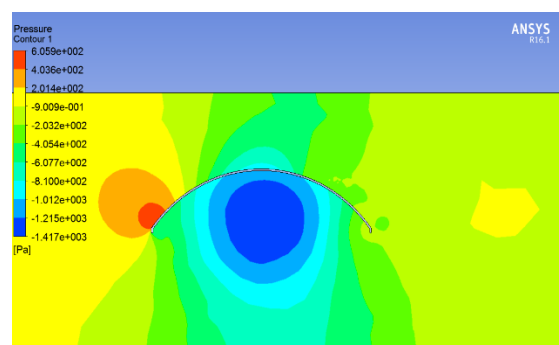


Figura 7.10 Distribució de pressions
 $f = 3,25$ m

La distribució de pressions varia també notablement en funció de la fletxa. De la *Figura 7.7* a la *Figura 7.10* s'observa com el punt d'estancament va augmentant el seu valor de forma poc significativa i es va desplaçant cap amunt a mesura que f augmenta. De forma anàloga, en

els punts on la velocitat és màxima, la pressió és mínima. Això s'observa amb claredat quan f val 1,6 i 2,15 m (*Figura 7.8* i *Figura 7.9*), en la zona central de la coberta superior.

A continuació, de la *Figura 7.11* a la *Figura 7.14* s'observen les línies de corrent que envolten el perfil de la coberta i mostren el comportament rotacional del flux entorn a l'objecte d'estudi.

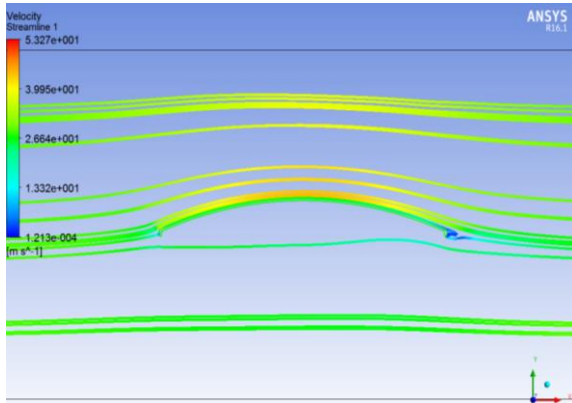


Figura 7.11 Línies de corrent
 $f = 1,3$ m

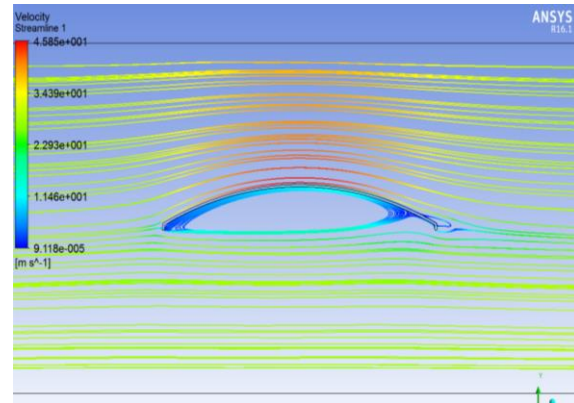


Figura 7.12 Línies de corrent
 $f = 1,6$ m

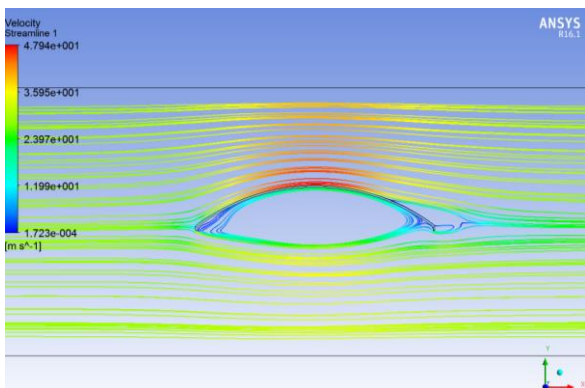


Figura 7.13 Línies de corrent
 $f = 2,15$ m

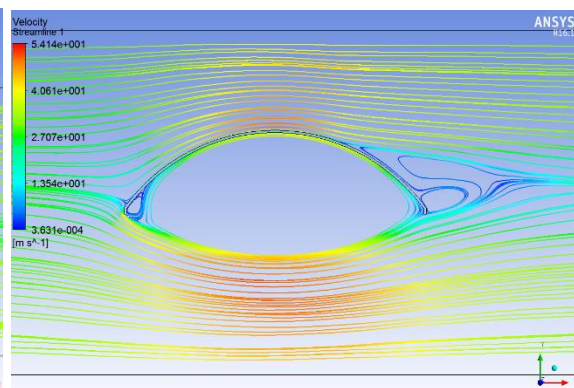


Figura 7.14 Línies de corrent
 $f = 3,25$ m

De la *Figura 7.15* a la *Figura 7.18* es mostra el perfil de velocitat que apareix en cada cas just al punt mig de la coberta. S'aprecia amb més detall el canvi en la direcció de la velocitat degut al desprendiment de la capa límit, que s'ha comentat anteriorment. En el cas en que el f pren el valor de 3,25 m, s'observa en detall el comportament de la velocitat de la zona del deixant que ocupa una gran superfície.



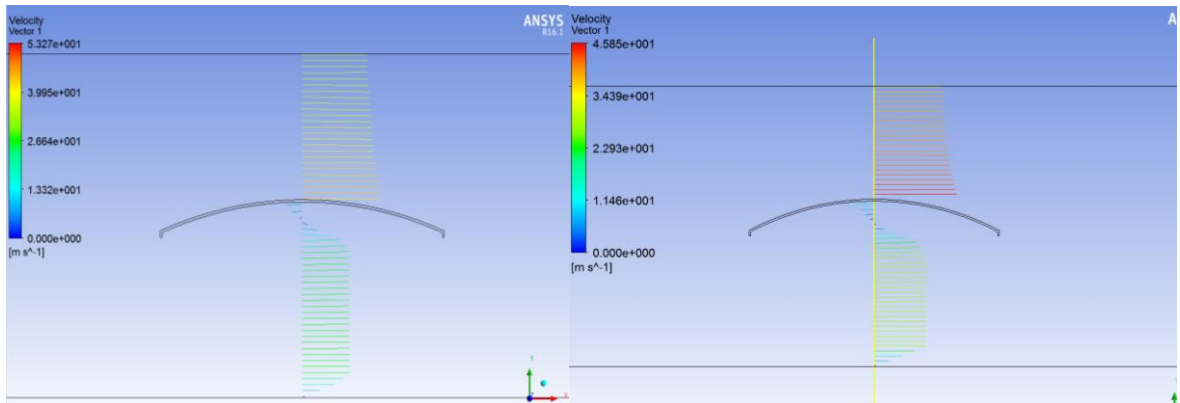


Figura 7.15 Detall perfil de velocitats
 $f = 1,3 \text{ m}$

Figura 7.16 Detall perfil de velocitats
 $f = 1,6 \text{ m}$

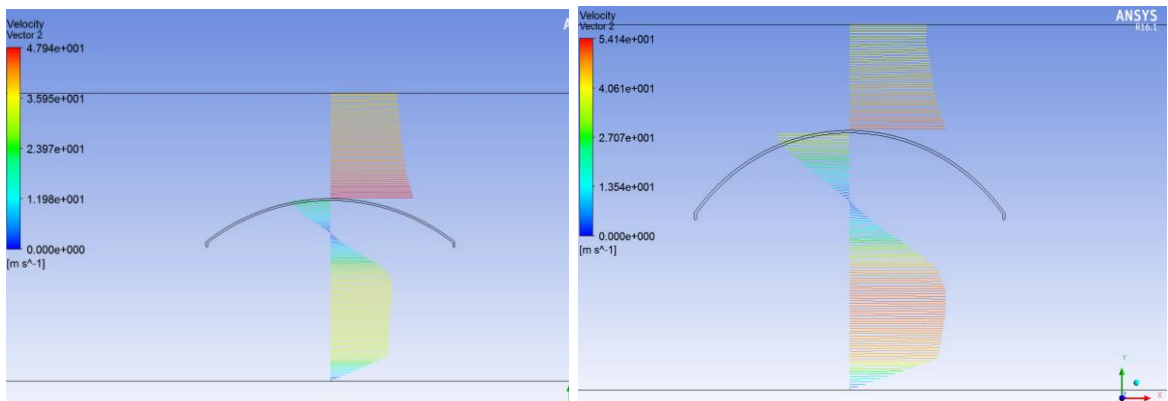
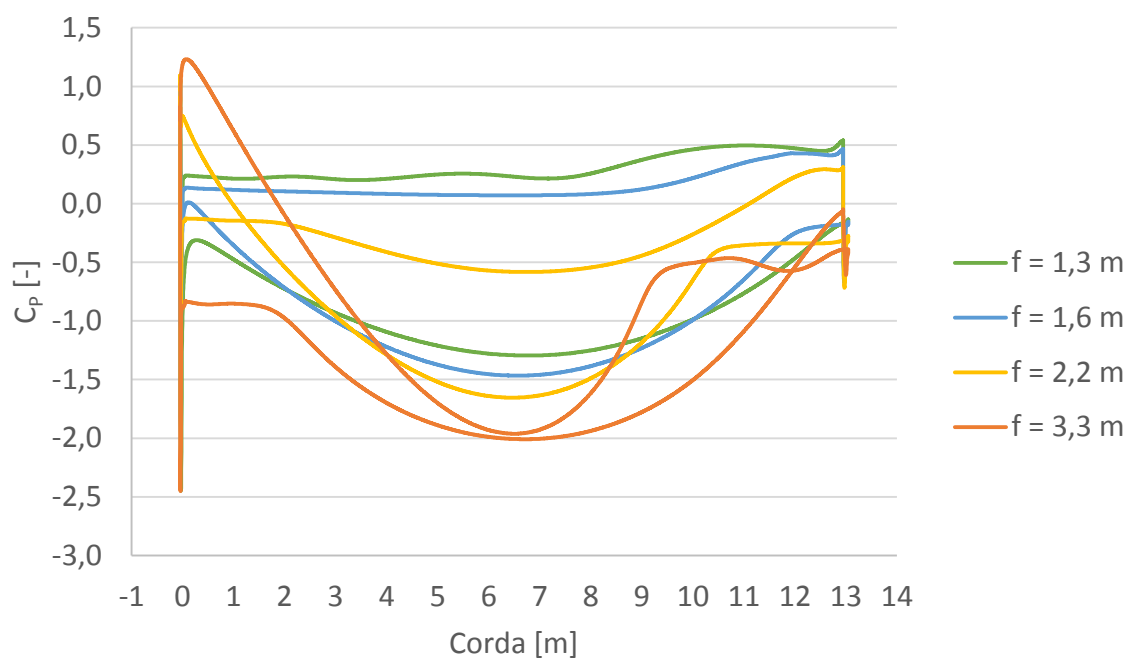


Figura 7.17 Detall perfil de velocitats
 $f = 2,15 \text{ m}$

Figura 7.18 Detall perfil de velocitats
 $f = 3,25 \text{ m}$

7.4. Coeficient de pressió

El Gràfic 7.3 mostra el valor del C_p tant de la superfície superior de la coberta com la inferior en cada cas. S'observa que aquest coeficient varia notablement en funció del valor que pren f . Per a poder fer un anàlisi més entenedor, s'ha realitzat els diagrames de la Figura 7.19. S'observa com varia la distribució de les pressions sobre les cares superior i inferior de la coberta i, a més a més, com la força resultant, que inicialment és positiva, va disminuint en magnitud fins a fer-se negativa quan f val 3,25 m.



Gràfic 7.3 Coeficient de pressió coberta amb biga

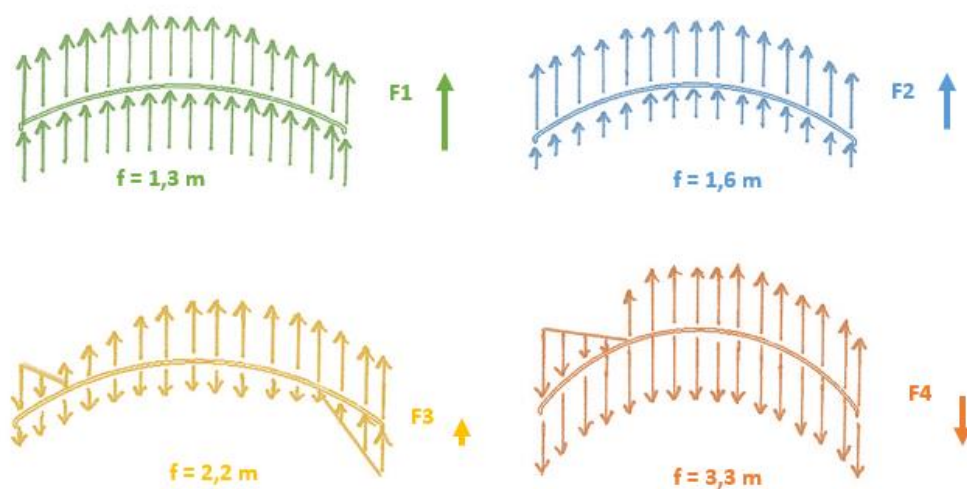


Figura 7.19 Diagrames distribució de pressions



8. Simulacions coberta tancada

8.1. Modificacions prèvies

Seguidament es realitza la simulació considerant que la coberta està suportada per parets anteriors i posteriors que tanquen el seu interior i l'aïllen del flux exterior d'aire. Aquesta simulació es fa per comparar amb el que hi ha en normativa sobre cobertes similars, doncs normalment es recullen resultats per a edificis tancats [1].

En concret, per a realitzar la simulació amb la coberta tancada, suposem bigues de recolzament davant i darrera conjuntament amb els pilars que suporten tota l'estructura. El domini que s'utilitzarà per aquesta simulació és el que es mostra en el plànol de la *Figura 8.1*.

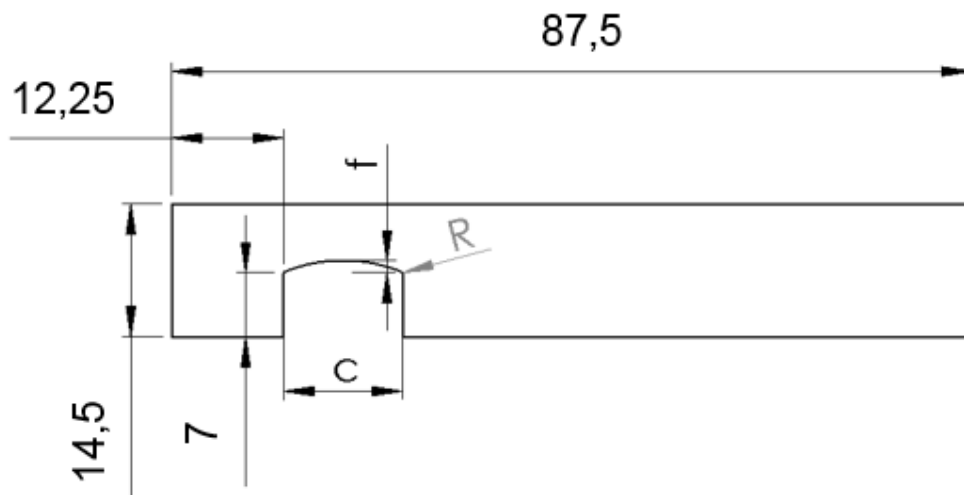


Figura 8.1 Plànol del domini de la coberta tancada [m]

A més a més es dur a terme una petita modificació en les condicions de contorn. Es considera una nova wall amb el nom de *RoofCompleat* que inclou les parets que conformen la coberta i els pilars. La resta romanen igual (*Figura 8.2*).

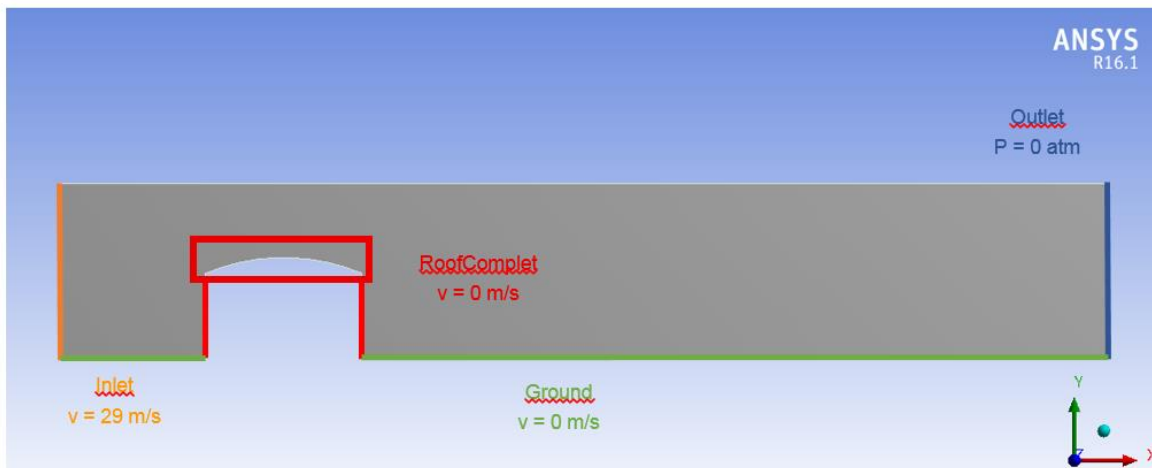


Figura 8.2 Condicions de contorn aplicades al domini

Es fa també una petita modificació de la malla. Després d'unes primeres simulacions de prova s'ha observat la gran dimensió del deixant que apareix arran de terra i a la part del darrera de l'obstacle. Per a poder simular millor els efectes que pugui tenir sobre l'estructura es fa un refinat de tota la zona posterior del domini augmentant el nombre d'elements d'aquesta zona (Figura 8.3).

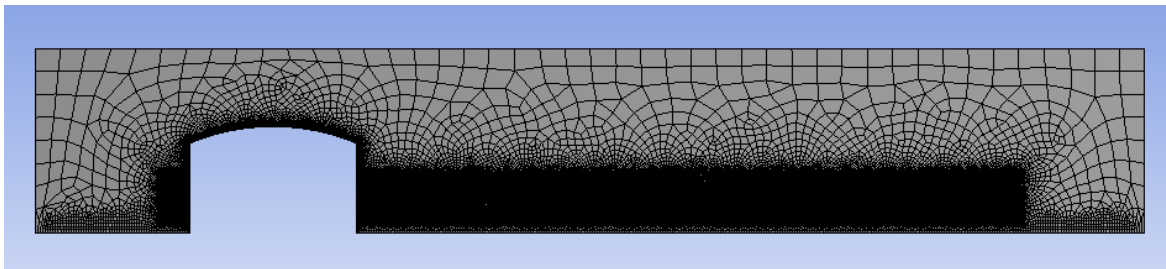


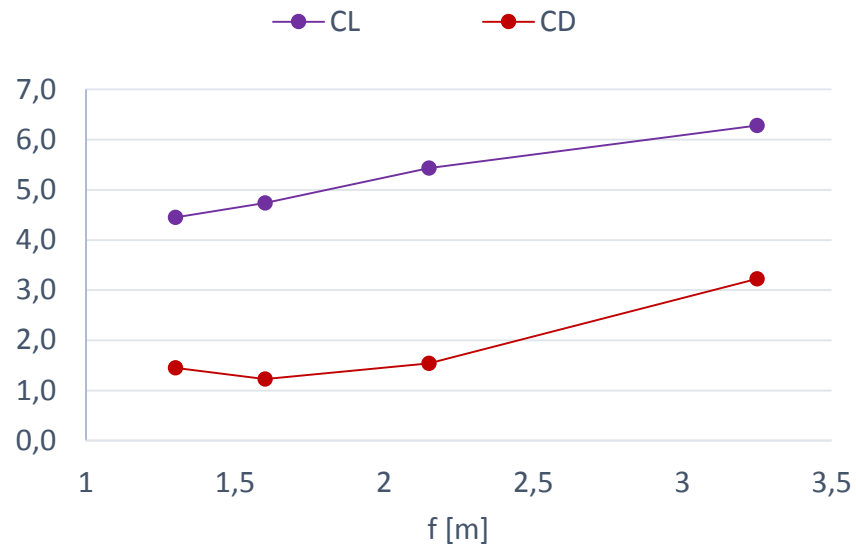
Figura 8.3 Domini mallat coberta tancada

Es torna a fer l'estudi de l'apartat 6.1. *Variació de la fletxa de l'arc* amb el nou disseny.

8.2. Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació

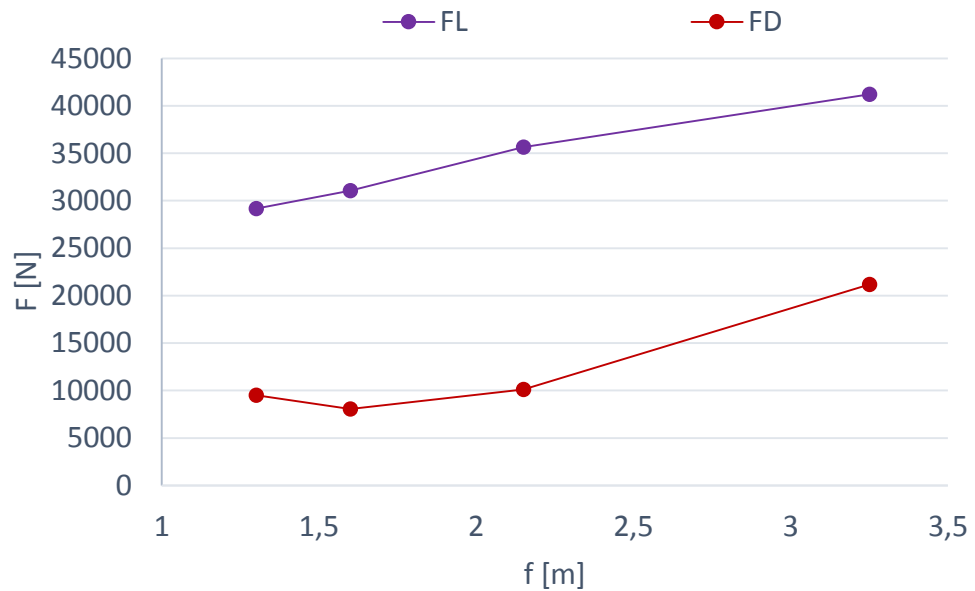
En el Gràfic 8.1 es mostra l'evolució dels valors dels coeficients de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la f . S'observa que tan el C_D com el C_L augmenten amb la fletxa i són positius en tots els casos. A més a més, el valor que tenen és notablement elevat.





Gràfic 8.1 Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la fletxa

D'aquests coeficients, s'obtenen les forces de resistència a l'avanç i sustentació per metre d'amplada. Al Gràfic 8.2 es mostra l'evolució d'aquestes dues forces. Els valors del gràfic són els que corresponents a 1 m d'amplada.



Gràfic 8.2 Forces de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la fletxa

8.3. Distribució de velocitats i pressions

Un cop analitzats aquests valors, es representen les propietats aerodinàmiques que transcorren sobre la coberta en cadascun dels casos. S'il·lustren la distribució de velocitats i pressions al voltant del perfil. També les línies de corrent i un detall d'aquestes sobre una zona d'interès del perfil.

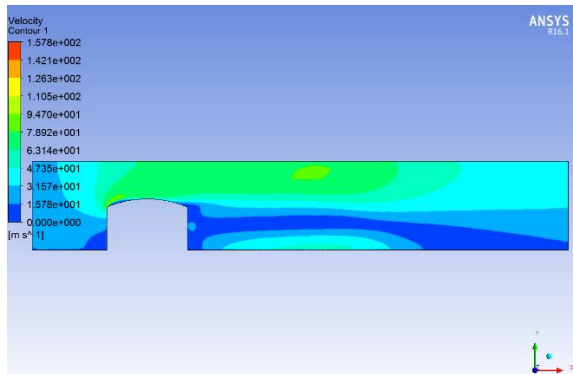


Figura 8.4 Distribució de velocitats
 $f = 1,3 \text{ m}$

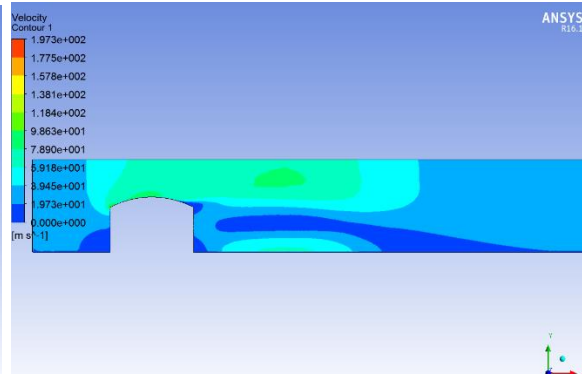


Figura 8.5 Distribució de velocitats
 $f = 1,6 \text{ m}$

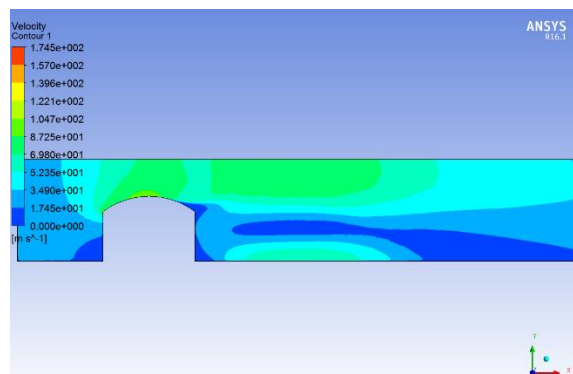


Figura 8.6 Distribució de velocitats
 $f = 2,15 \text{ m}$

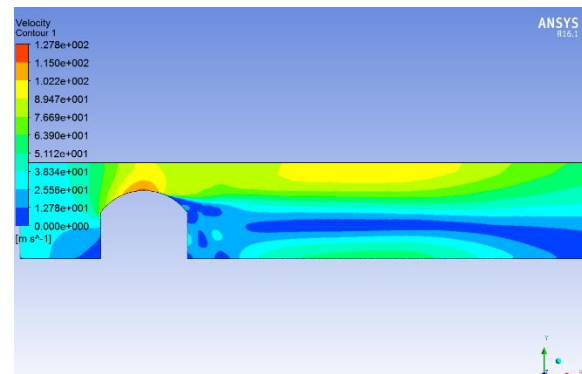


Figura 8.7 Distribució de velocitats
 $f = 3,25 \text{ m}$

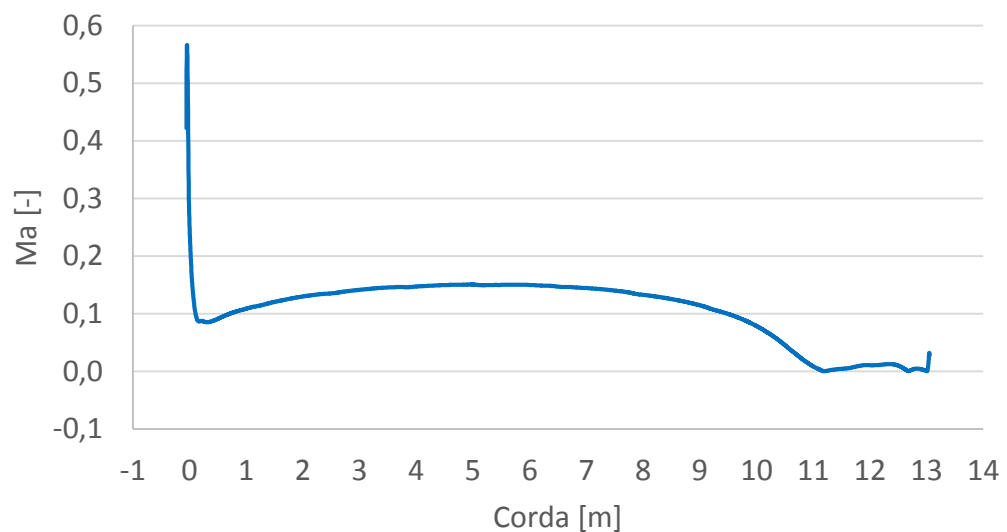
La distribució de velocitats depèn notablement del valor que pren f . Es pot observar que el cas on es genera la màxima velocitat és quan f val $1,6 \text{ m}$ (Figura 8.5). En aquest cas s'arriba a 197 m/s i es troba just a l'inici de la curvatura de la coberta, doncs el perfil presenta un canvi molt brusc en la geometria. En canvi, quan la fletxa de l'arc pren el valor de $3,25 \text{ m}$ (Figura 8.7), apareixen unes velocitats més baixes, ja que el canvi de geometria que hi ha entre el pilar i la coberta és més suau i continu. En aquest cas la velocitat màxima és de 128 m/s .



En aquesta simulació estem en flux compressible donat que el nombre de Mach (eq. 4.8) és superior a 0,3. És a dir, si prenem la velocitat màxima quan la fletxa val 1,6 m s'obté:

$$M_a = \frac{197}{340} \simeq 0,58$$

Quan hi ha flux compressible, és necessari fer servir un model diferent de simulació que tingui en compte l'equació de l'energia (eq. 4.14). En aquest projecte s'ha utilitzat el mateix model de simulació per a tots els casos perquè, tal com es pot veure en el Gràfic 8.3, les zones del domini on es produeix aquest valor són molt petites.



Gràfic 8.3 Nombre de Mach per $f = 1,6$ m

Tornant a les distribucions de velocitats, en el primer cas de tots hi ha dos punts de separació, és a dir, dos punts on es produeix el fenomen del desprendiment de la capa límit (*Figura 8.4*). El primer de tots es presenta just a l'inici del perfil de la coberta i ràpidament es torna a reenganxar per a resseguir el perfil de la coberta. Els altres tres casos presenten aquest fenomen a la part posterior de la coberta (*Figura 8.5 a Figura 8.7*). Com més elevat és el paràmetre, abans es produeix el desprendiment de la capa límit.

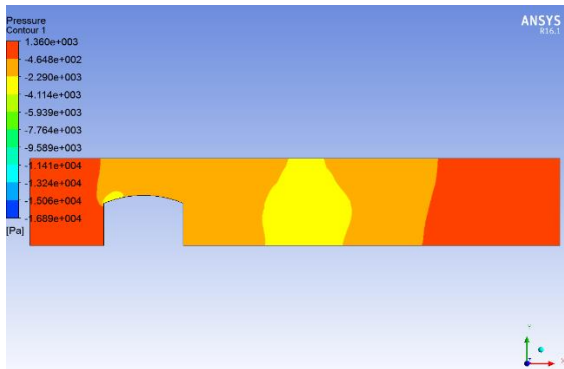


Figura 8.8 Distribució de pressions
 $f = 1,3 \text{ m}$

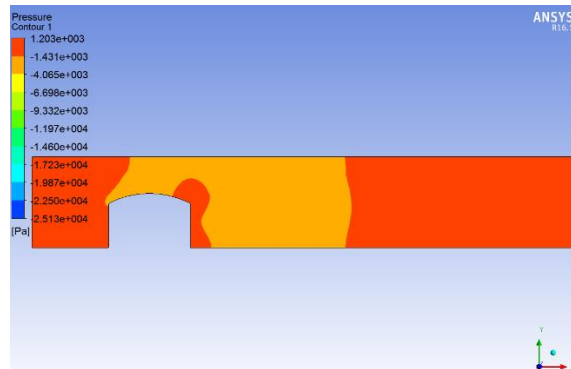


Figura 8.9 Distribució de pressions
 $f = 1,6 \text{ m}$

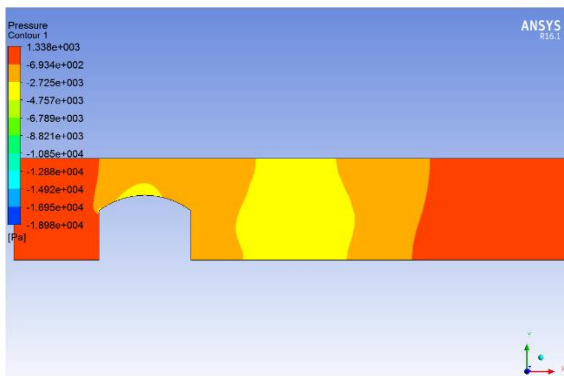


Figura 8.10 Distribució de pressions
 $f = 2,15 \text{ m}$

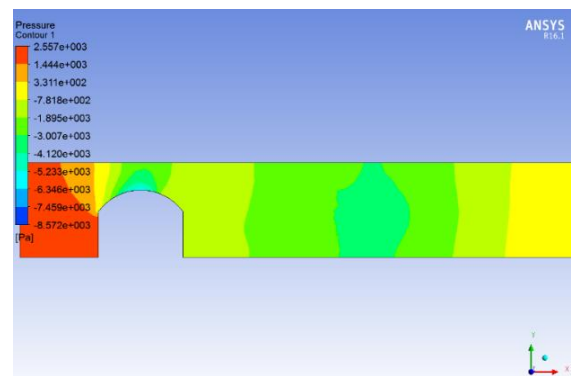


Figura 8.11 Distribució de pressions
 $f = 3,25 \text{ m}$

La distribució de pressions varia també notablement en funció del valor de f (*Figura 8.8* a *Figura 8.11*). Observar que la zona de màxima pressió correspon a la part frontal de l'objecte d'estudi, on el fluid incideix sobre tota l'estructura. Les pressions més baixes es troben en els punts on la velocitat és màxima, és a dir, en els punts on hi ha canvi brusc en la geometria.

A continuació, de la *Figura 8.12* a la *Figura 8.15* s'observen les línies de corrent que envolten el perfil de la coberta i mostren el comportament del flux entorn a l'objecte d'estudi.



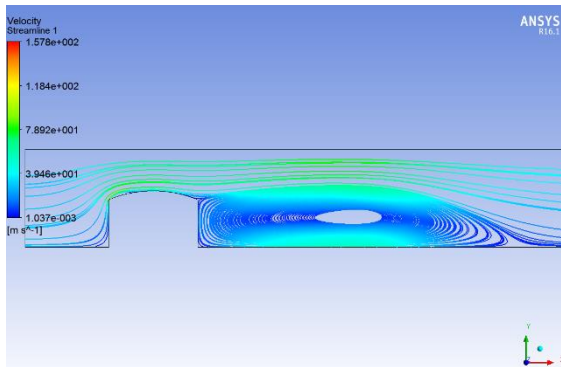


Figura 8.12 Línies de corrent
 $f = 1,3 \text{ m}$

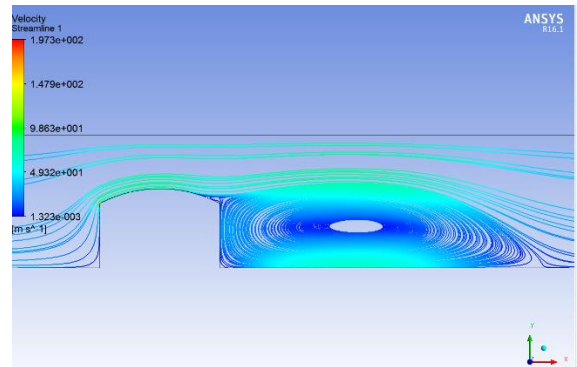


Figura 8.13 Línies de corrent
 $f = 1,6 \text{ m}$

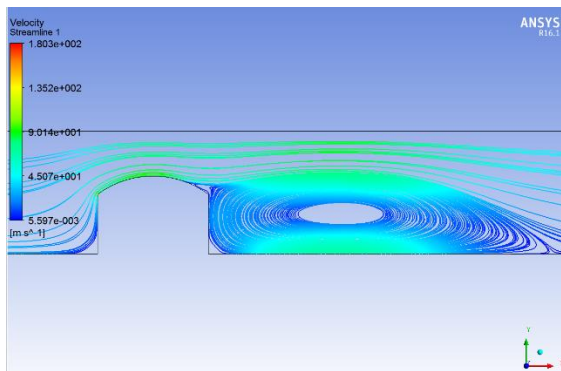


Figura 8.14 Línies de corrent
 $f = 2,15 \text{ m}$

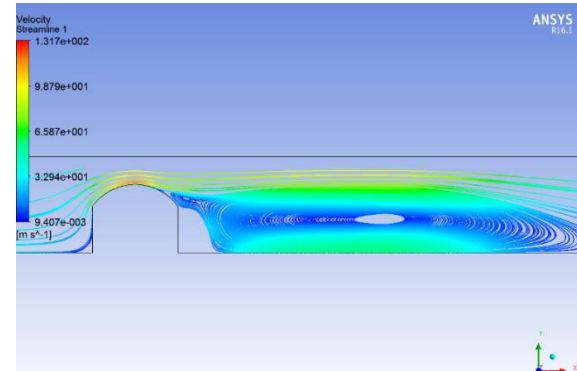


Figura 8.15 Línies de corrent
 $f = 3,25 \text{ m}$

De la Figura 8.16 a la Figura 8.23 es mostra el perfil de velocitat en zones d'interès de cada cas. En la Figura 8.16 i la Figura 8.17 s'aprecia en detall el primer desprendiment de la capa límit i la zona del deixant respectivament. En les següents figures s'observa el perfil de velocitats al l'inici de la coberta (Figura 8.18 i Figura 8.20) i al deixant (Figura 8.19 i Figura 8.21). En tots els casos on hi ha desprendiment s'aprecia amb més detall el canvi en la direcció de la velocitat. Per últim, en la Figura 8.22 i la Figura 8.23, es mostra el perfil de velocitats en la zona de desprendiment de la capa límit i el deixant, respectivament. El perfil de velocitats de la zona del deixant permet apreciar amb més detall el comportament de la velocitat de la zona turbulenta.

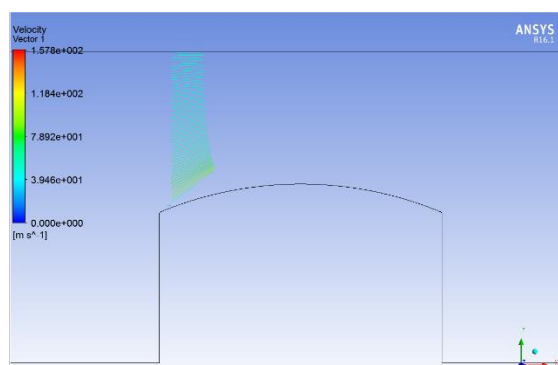


Figura 8.16 Detall perfil de velocitats inici coberta f = 1,3 m

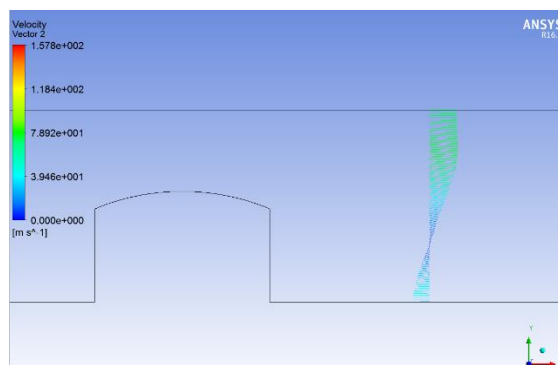


Figura 8.17 Detall perfil de velocitats deixant f = 1,3 m

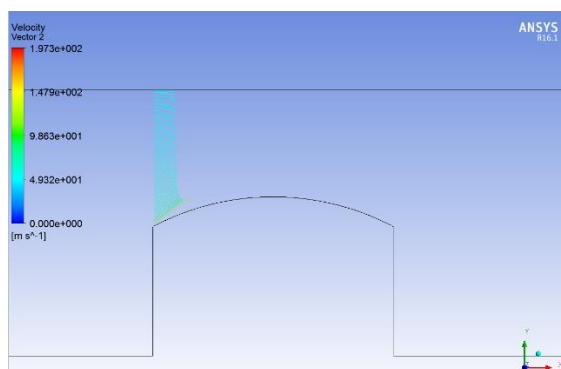


Figura 8.18 Detall perfil de velocitats inici coberta f = 1,6 m

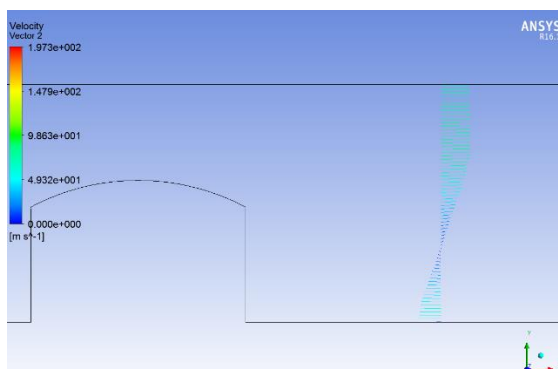


Figura 8.19 Detall perfil de velocitats deixant f = 1,6 m

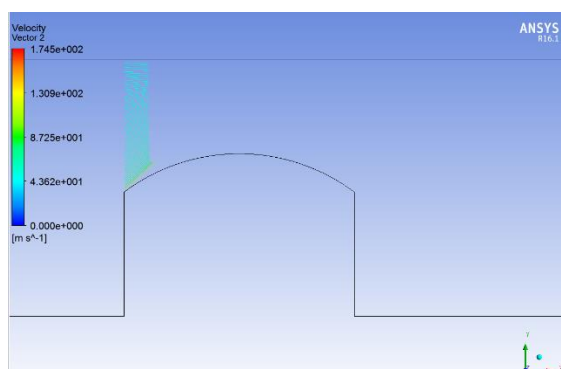


Figura 8.20 Detall perfil de velocitats inici coberta f = 2,15 m

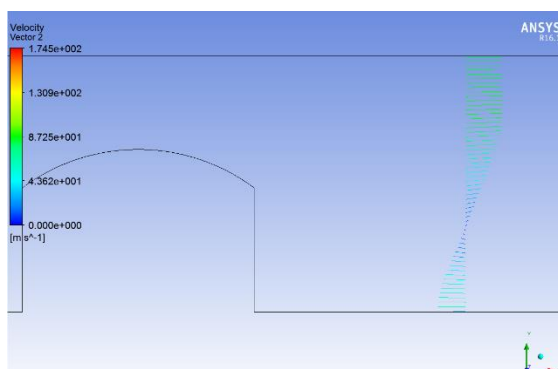


Figura 8.21 Detall perfil de velocitats deixant f = 2,15 m



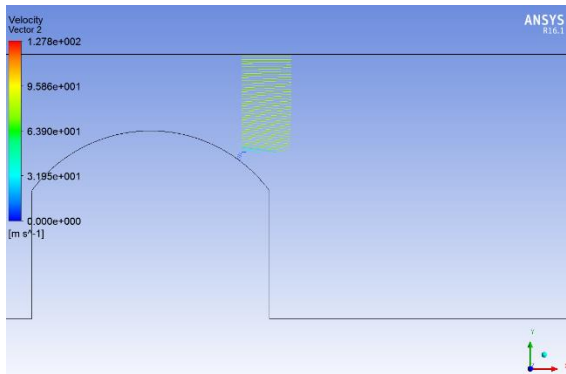


Figura 8.22 Detall perfil de velocitats punt de separació $f = 3,25$ m

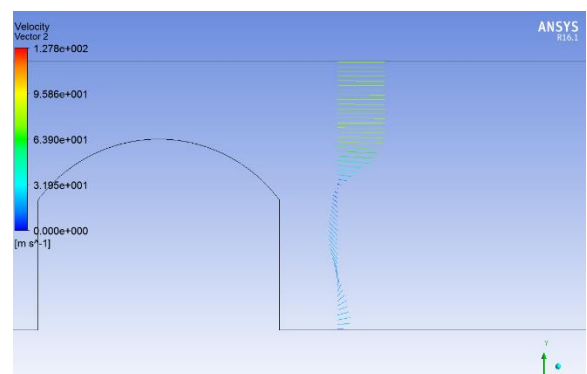
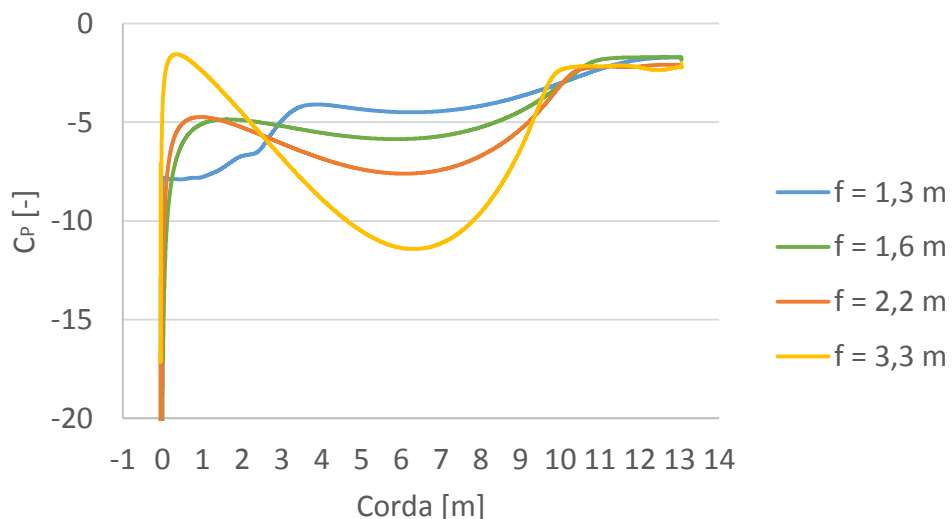


Figura 8.23 Detall perfil de velocitats deixant $f = 3,25$ m

8.4. Coeficient de pressió

El Gràfic 8.4 mostra el valor de C_p a la superfície superior de la coberta per cada f . S'observa que aquest coeficient varia en funció de f . S'observa que en tots els casos el C_p és negatiu al llarg de tot el sostre i, per tant, la coberta tendeix a expandir-se, és a dir, es genera una succió en la direcció positiva de l'eix y. La força resultant és aproximadament la mateixa per a tots els casos. No obstant, quan f pren el valor de 3,125 m, és una mica més elevada, però no notablement.



Gràfic 8.4 Coeficient de pressió coberta tancada

8.5. Discussió resultats

Com ja s'ha comentat en aquest capítol, al realitzar la simulació amb la coberta totalment tancada s'observen resultats molt diferents.

El C_D i el C_L són elevats i tendeixen a incrementar al augmentar el valor de la fletxa de l'arc. A més a més, s'observa també que el C_P és elevat i negatiu en tota la coberta. Es produeix un efecte d'aspiració vertical que augmenta amb la fletxa. Per a entendre aquest resultats s'ha fet un anàlisi una mica més detallat. De la *Figura 8.24* a la *Figura 8.31* es mostra una ampliació del domini, per mostrar en detall la distribució de velocitats i pressions en el punt d'estancament.

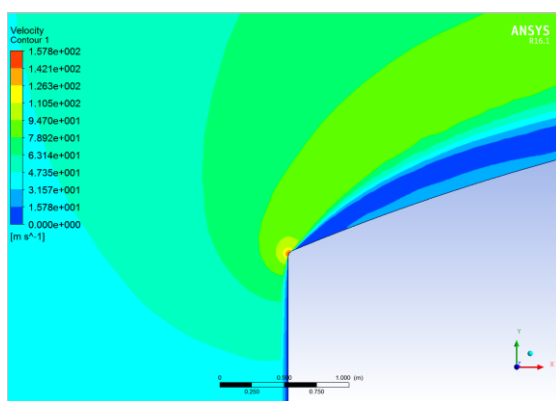


Figura 8.24 Distribució de velocitats
 $f = 1,3 \text{ m}$

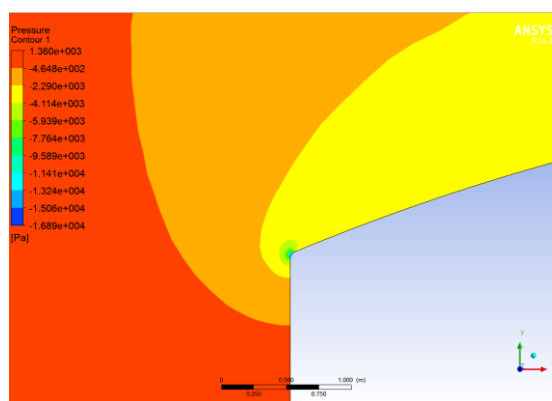


Figura 8.25 Distribució de pressions
 $f = 1,3 \text{ m}$

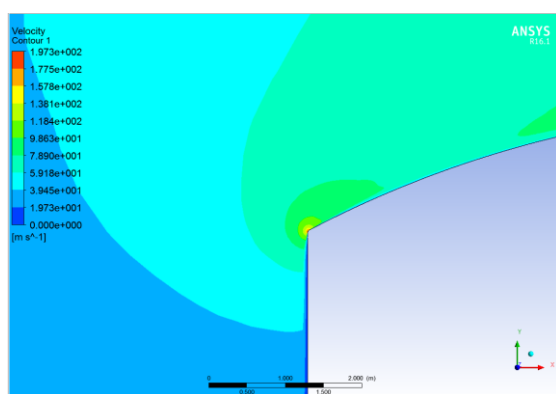


Figura 8.26 Distribució de velocitats
 $f = 1,6 \text{ m}$

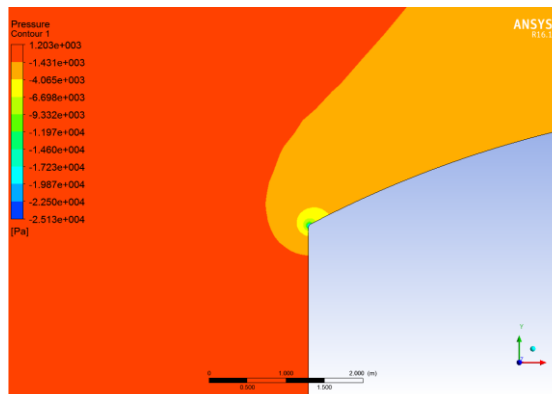


Figura 8.27 Distribució de pressions
 $f = 1,6 \text{ m}$



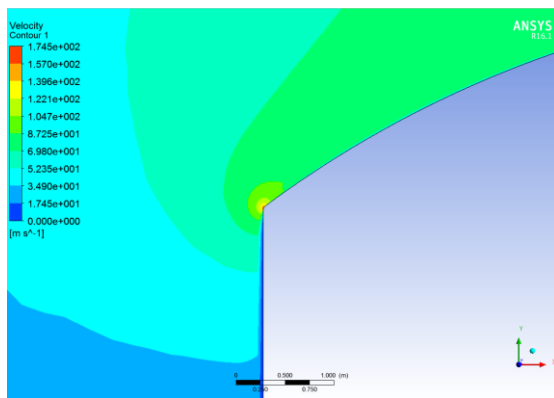


Figura 8.28 Distribució de velocitats
f = 2,15 m

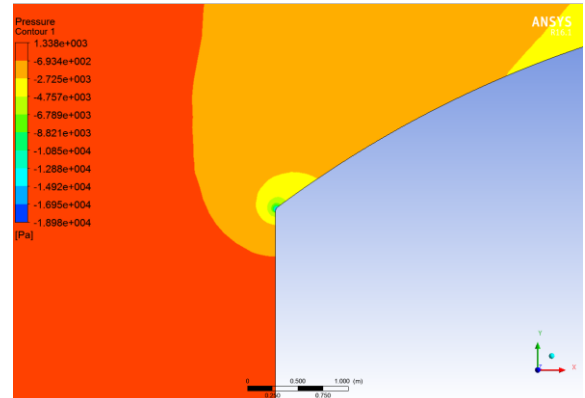


Figura 8.29 Distribució de pressions
f = 2,15 m

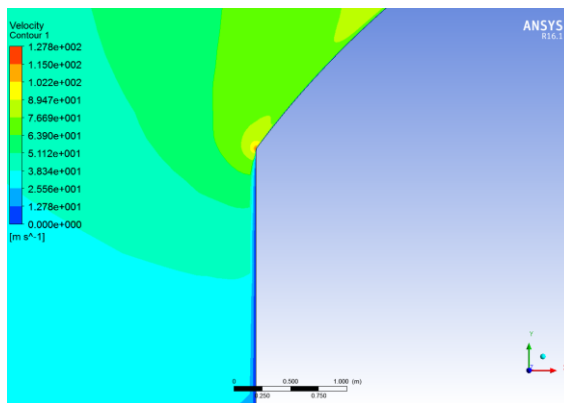


Figura 8.30 Distribució de velocitats
f = 3,25 m

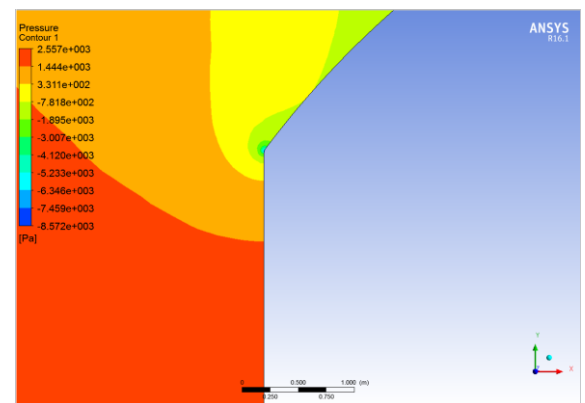


Figura 8.31 Distribució de pressions
f = 3,25 m

De l'anàlisi de les distribucions de velocitat i pressió, es pot concloure que el flux s'accelera molt en aquest punt i, conseqüentment, la pressió cau per sota la pressió atmosfèrica. Això s'hauria de comparar amb dades recollides experimentalment, doncs podria ser que en condicions reals això no passés. A causa de l'acció del vent, aleatòria i subjecte a la turbulència, es complica l'estudi per a determinar quines accions produeix aquest sobre un sostre. Aquesta última simulació n'és un exemple. No es coneixen amb exactitud la direcció ni l'angle d'incidència de la corrent fluids sobre el sostre. A més a més, aquesta podria no ser constant.

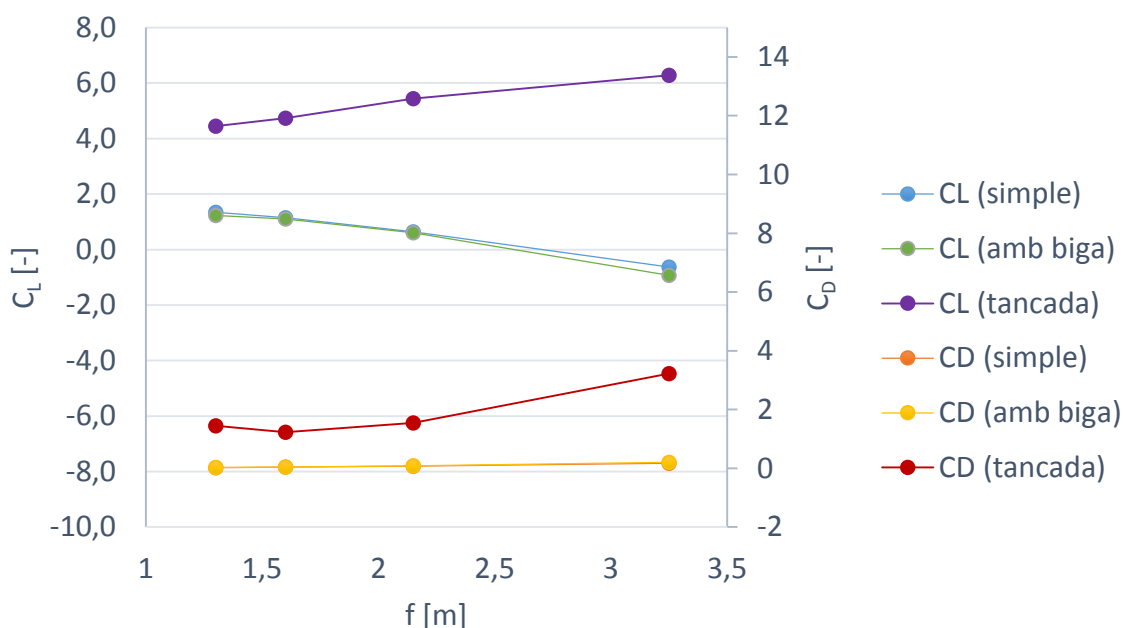
Un altre fet a tenir en compte és la simplificació que s'ha realitzat del perfil de la biga. La geometria d'aquesta influiria en els resultats d'aquesta simulació. Amb tot això, cal destacar que la simulació amb coberta tancada és un resultat teòric i orientatiu.

9. Comparació i discussió de resultats

Com s'ha vist en aquest projecte, s'ha realitzat simulacions per tres dissenys de coberta. La diferència entre elles resideix en la geometria de l'objecte de l'estudi que s'ha utilitzat en cada una d'elles. Primerament s'ha simulat el cas més senzill, el qual comporta només el perfil de la coberta. Seguidament s'ha fet un nou disseny de la geometria i, per tant, del domini, tot incorporant-hi les bigues de suport en els dos extrems on es recolza la coberta. Finalment, s'ha realitzat la simulació de tota la coberta tancada, incloent-hi els pilars que sustenten tota l'estructura. Aquestes simulacions han estat explicades en els apartats 6, 7 i 8. Totes tres tenen en comú que s'ha utilitzat com a variable la dimensió de la fletxa de l'arc de la coberta, per a poder observar com les accions aerodinàmiques sobre el cos depenen de la variació d'aquest paràmetre. En cada simulació s'ha realitzat un estudi comparatiu amb 4 valors de f : $c/10$ (1,3 m), $c/8$ (1,6 m), $c/6$ (2,15 m) i $c/4$ (3,25 m), sent c la corda de l'arc.

9.1. Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació

A continuació es mostren els gràfics dels coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació en funció de la fletxa (*Gràfic 9.1*). En cada gràfic hi ha representats els resultats obtinguts en les tres simulacions.



Gràfic 9.1 Coeficients de resistència a l'avanç i sustentació en funció de la fletxa de les tres simulacions

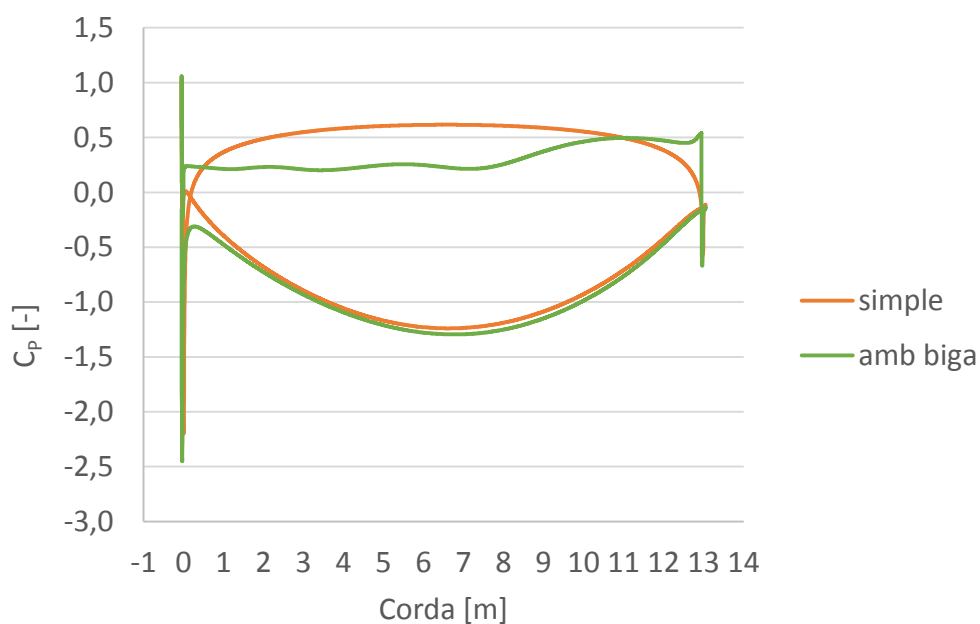


S'observa que amb la simulació de la coberta simple i la que inclou la biga s'obtenen resultats similars, només quan la fletxa pren el valor de 3,25 m es diferencien lleugerament. El més important és destacar que en totes dues simulacions els resultats tenen la mateixa tendència. El coeficient de resistència a l'avanç incrementa al augmentar el valor de la fletxa, tot i tenir un pendent molt petit, i el coeficient de sustentació decreix com més gran és la fletxa fins arribar a valors negatius.

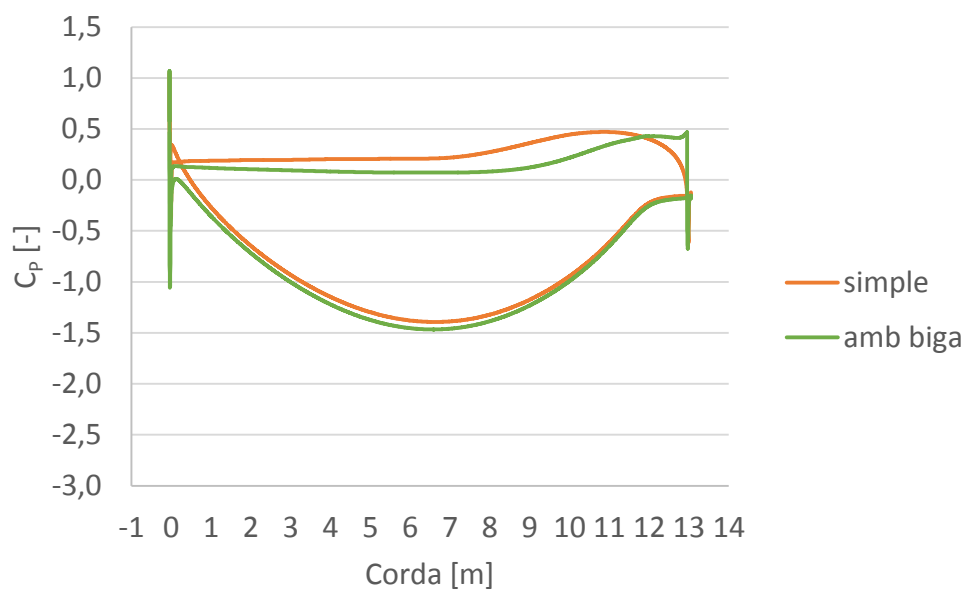
En canvi, al realitzar la simulació amb la coberta totalment tancada s'observen uns resultats molt diferents. El C_D és molt més elevat, ja que ara apareix la resistència provocada pel pilar frontal, és a dir, hi ha una superfície més gran que ofereix resistència. Tot i presentar un increment major en valor, la tendència segueix sent la mateixa que en les altres dues simulacions: augmentar amb l'augment de la fletxa. En el cas del C_L és també més elevat que en les altres simulacions, però no segueix la mateixa tendència, sinó que sempre augmenta en incrementar el valor de f .

9.2. Coeficient de pressió

A més a més, en aquest estudi també s'analitzen els coeficients de pressió localitzats al llarg de tot el perfil de la coberta. Es comparen els resultats obtinguts pels quatre valors de fletxa escollits per aquest estudi en les dues primeres simulacions: coberta simple i coberta amb biga. No s'inclouen en la comparació els resultats obtinguts amb la simulació de la coberta tancada, doncs només és te una superfície i els valors del coeficient són molt més elevats i negatius en tots els casos, tal com s'ha comentat en l'apartat 8.4. *Coeficient de pressió* d'aquest projecte. En el *Gràfic 9.2* al *Gràfic 9.5* s'observa que en tots els casos el coeficient de pressions a la superfície superior de la coberta no varia de forma significativa. La diferencia roman majoritàriament en la superfície inferior.



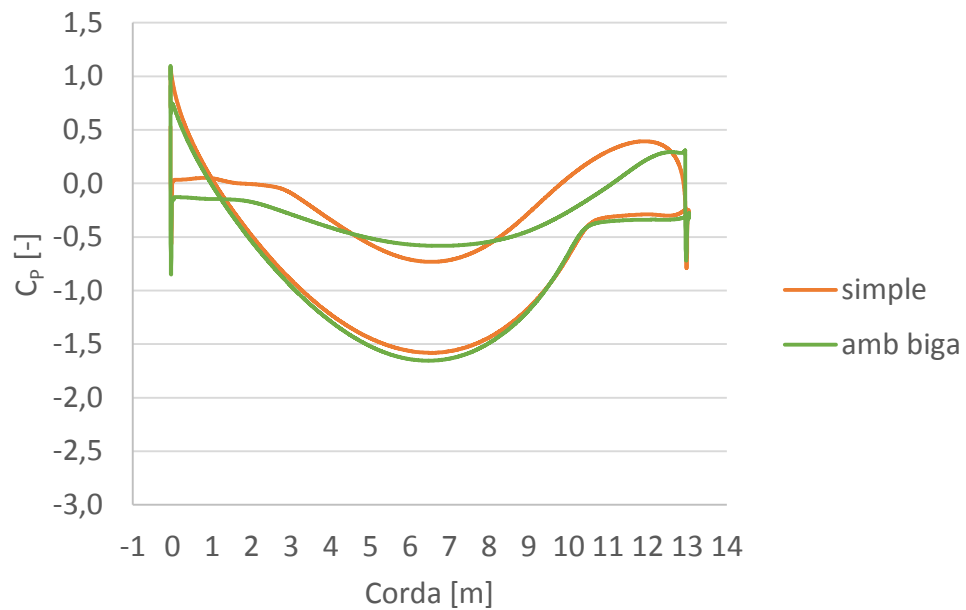
Gràfic 9.2 Coeficient de pressió quan $f = 1,3$ m amb coberta simple i amb biga



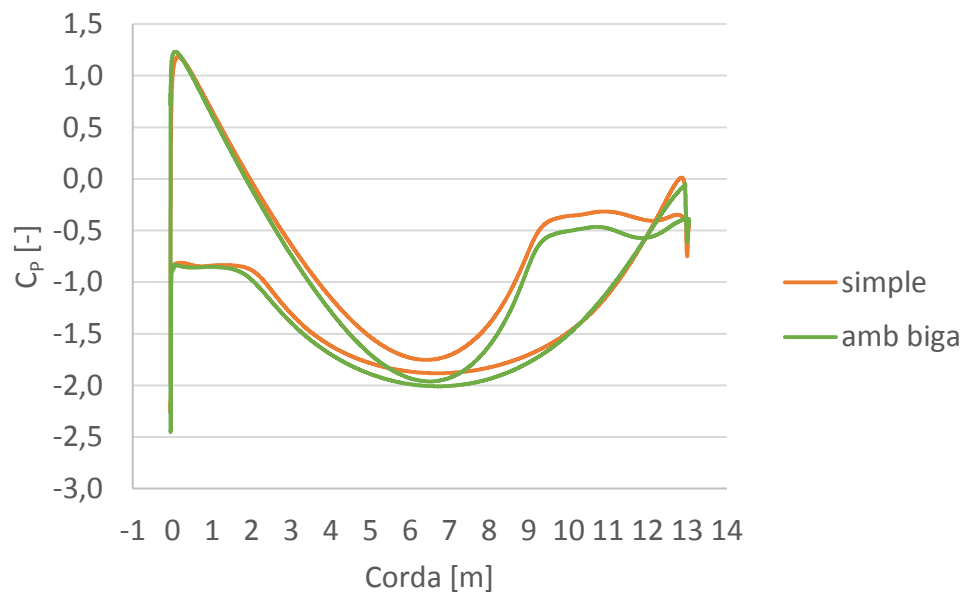
Gràfic 9.3 Coeficient de pressió quan $f = 1,6$ m amb coberta simple i amb biga

Quan la fletxa pren el valor de 1,3 i 1,6 m, la pressió és en general menor a la superfície superior de la coberta que a la inferior generant una sustentació positiva (Gràfic 9.2 i Gràfic 9.3).





Gràfic 9.4 Coeficient de pressió quan $f = 2,15$ m amb coberta simple i amb biga



Gràfic 9.5 Coeficient de pressió quan $f = 3,25$ m amb coberta simple i amb biga

Quan el paràmetre pren el valor de 2,15 m (Gràfic 9.4), les pressions a la coberta inferior es redueixen i són properes al valor de la pressió atmosfèrica provocant una reducció de la sustentació positiva. En el Gràfic 9.5, quan f val 3,25 m, part de les pressions a la cara inferior passen a ser més negatives que les de la coberta superior provocant el canvi de signe a la sustentació que passa a ser negativa.

10. Programació

A la *Taula 10.1* s'esmenen cadascuna de les etapes o activitats que s'han dut a terme en la realització d'aquest projecte.

Activitat	Inici	Duració [dies]	Final
<i>Determinació del problema</i>	03/07/2015	5	08/07/2015
<i>Definició del projecte</i>	08/07/2015	2	10/07/2015
<i>Documentació aerodinàmica i CFD</i>	10/07/2015	76 ¹	25/10/2015
<i>Aprenentatge CFD</i>	10/07/2015	46 ¹	25/09/2015
<i>Estudi mallat</i>	20/09/2015	40	30/10/2015
<i>Definició casos a simular</i>	27/09/2015	68	04/12/2015
<i>Realització simulacions</i>	27/09/2015	91	27/12/2015
<i>Obtenció de resultats i anàlisi de dades</i>	19/11/2015	38	27/12/2015
<i>Comparació i discussió dels resultats</i>	27/12/2015	8	04/01/2016
<i>Redacció memòria</i>	01/10/2015	101	10/01/2016
<i>Pressupost</i>	02/01/2016	2	04/01/2016
<i>Impacte ambiental</i>	04/01/2016	1	05/01/2016
<i>Conclusions</i>	05/01/2016	1	06/01/2016
<i>Preparació presentació</i>	16/01/2016	4	20/01/2016

¹s'han restat els 31 dies d'agost per vacances

Taula 10.1 Programació del projecte

El diagrama de Gantt de la *Figura 10.1* permet entendre millor aquesta programació. En aquest es reflexa l'evolució del treball amb la seva corresponent duració. A més a més, es poden diferenciar clarament quines són les etapes de major durabilitat i quines altres han requerit menor temps per a dur-les a terme. Com s'observa al diagrama de Gantt, la realització de totes les simulacions i el procés de redacció de la memòria són el que ha requerit el major temps de treball (s'ha de tenir en compte que durant el mes d'agost no va ser possible dur a terme les simulacions per falta de recursos).



*Figura 10.1* Diagrama de Gantt del projecte

11. Pressupost

El pressupost dels costos totals s'enfoca com si es tractes d'una empresa que duu a terme aquest projecte. En aquest apartat es detallen els costos necessaris per a la realització del projecte. Es diferencien dos tipus de costos: els costos directes i els indirectes.

11.1. Costos directes

Al tractar-se d'un estudi teòric, la major part del pressupost recau en les hores invertides per part d'un enginyer exercides en les diferents fases, dutes a terme de manera alternada al llarg de tot el projecte, amb una duració total estimada de 450 h. Aquests són els costos de recursos humans.

S'estima que el salari anual d'un enginyer és de 40.000 € per a 1.800 h anuals treballades [15]. S'ha de tenir en compte que cal sumar-li el 30% referent a la Seguretat Social. En aquest càlcul no es té en compte altres tipus de beneficis socials que puguin haver inclòs en el contracte. Per tant, el salari d'un enginyer industrial és de 28,89 €/h.

En els costos directes es té també en compte els costos del material que es necessita per a dur a terme el projecte. Entenem com a material el propi d'oficina (paper, bolígrafs, llapis, impressora, etc.), l'ordinador, les llicències dels programes utilitzats i altres, doncs no es construeix cap prototip.

Per al càlcul de l'amortització s'ha estimat una vida útil de 3 anys per l'ordinador, 2 anys pel software de disseny SolidWorks i de 2 anys pel de simulació ANSYS, ambdós treballant a raó de 20h setmanals.

Costos directes

Concepte	Temps invertit [h]	Salari [€/h]	Total [€]
<i>Documentació i estudis previs</i>	40	28,89	1.155,60
<i>Modelat amb SolidWorks</i>	15	28,89	433,35
<i>Simulació</i>	280	28,89	8.089,20
<i>Anàlisis resultats</i>	115	28,89	3.322,35



Concepte	Preu adquisició [€]	Vida útil [h]	Utilització [h]	Total [€]
<i>Material d'oficina</i>	-	-	-	100,00
<i>Ordinador personal</i>	3.000	2.880	450	468,75
<i>SolidWorks</i>	6.000	1.920	10	531,25
<i>ANSYS Workbench 16.1</i>	30.000	1.920	415	484,38
COST TOTAL:				14.584,88

Taula 11.1 Càlcul desglossat dels costos directes

11.2. Costos indirectes imputables

En els costos indirectes es té en compte els costos que es deriven de l'ús dels recursos materials, en concret els que es deriven de l'ús de l'ordinador, com són els costos de consum elèctric i la connexió a internet.

Per comptabilitzar la despesa energètica s'ha considerat que l'ordinador personal s'ha utilitzat per a les fases de documentació, aprenentatge del software, estudi de mallat, simulació i anàlisi de resultats. En total són aproximadament 450 h.

Costos indirectes

Concepte	Consum [kW]	Utilització	Preu unitari	Total [€]
<i>Consum elèctric</i>	0,2	450 h	0,15 €/kWh	13,50
<i>Connexió a internet</i>	-	5 mesos	38,82 €/mes	194,10
COST TOTAL:				207,6

Taula 11.2 Càlcul desglossat dels costos indirectes

11.3. Cost total del projecte

Per a fer una correcta estimació del cost total del projecte, cal tenir present els costos indirectes no imputables. Aquests engloben els costos de lloguer d'un local, el subministrament d'aigua i gas, el servei de manteniment de les instal·lacions, el cost del consum elèctric de l'il·luminat utilitzat, els costos provinents dels departaments de comptabilitat, administració, recursos humans, entre d'altres. L'empresa on es duu a terme el projecte establirà un percentatge sobre els costos totals que representi l'acord que s'hagi establert per a quantificar els costos indirectes no imputables i el marge a aplicar per a l'obtenció de beneficis amb la realització d'aquest projecte.

A continuació es mostra el cost total de la realització del projecte.

Costos totals del projecte

Concepte	Percentatge [%]	Cost [€]
<i>Costos directes</i>	-	14.584,88
<i>Costos indirectes imputables</i>	-	207,6
<i>Total costos imputables</i>	-	14.792,48
<i>Costos indirectes no imputables</i>	10	1.479,25
<i>Marge</i>	5	739,62
COST TOTAL del PROJECTE:		17.011,35

Taula 11.3 Càlcul desglossat del cost total del projecte



12. Impacte mediambiental

En aquest capítol s'identificaran i avaluaran els efectes provocats pel projecte sobre el medi físic i social, tant durant la realització d'aquest com els que podrien sorgir en la construcció de les cobertes en les pistes de clubs esportius.

12.1. Referent a l'elaboració del projecte

Pel que fa a l'impacte mediambiental durant la realització del projecte, degut a la naturalesa d'aquest no es considera rellevant la realització d'un estudi exhaustiu d'impacte ambiental, ja que es tracta d'un procés de disseny, simulació i comparació dels resultats obtinguts generat íntegrament per ordinador. A més a més, tampoc es disposa d'una part experimental. Tot i això, s'analitzaran els recursos consumits durant la realització del projecte i els residus generats per l'ús de consumibles [16].

L'impacte ambiental provocat pels recursos consumits durant la realització del projecte es redueix a les emissions de CO₂ derivades del consum elèctric; tant per a il·luminar la zona de treball, com per a fer funcionar l'ordinador. Per a calcular les emissions citades, es considera que 1 kWh produeix 0,65 kg de CO₂, tal com estableix la Comissió Europea. En la *Taula 12.1* es mostra de forma desglossada aquest impacte ambiental.

Emissions de CO₂ durant l'elaboració del projecte

Element de consum	Temps de consum [h]	Consum de potència [W]	Consum d'energia [kWh]	Consum de CO ₂ [kg]
<i>Ordinador</i>	450	200	90	58,5
<i>Il·luminació</i>	120	90	10,8	7,02
EMISSIONS TOTALS DE CO₂:				65,52

Taula 12.1 Emissions de CO₂ totals derivades del consum elèctric

A més a més, pel que fa als residus generats per l'ús de consumibles, cal tenir en compte que per a dur a terme el projecte s'ha utilitzat paper en format A4 (6,24 m² d'àrea); tant durant la elaboració del projecte, com en la impressió de la memòria del projecte. S'ha utilitzat aproximadament 150 fulls blancs de format A4 amb un gramatge de 90 g/m². Això suposa un pes total de 0,56 kg que representa 1,68 kg de CO₂ per full utilitzat. La Comissió Europea estableix que 1 kg de paper blanc equival a 3 kg de CO₂.

12.2. Referent a la construcció de la coberta

En quant a la construcció de la coberta, primerament seria necessari obtenir dades experimentals per a poder corroborar els resultats obtinguts en la simulació. Això comportaria l'ús de consumibles i de consum elèctric per a l'ús dels dispositius emprats en la recollida de dades.

L'impacte ambiental més important d'aquest projecte seria en la construcció de la pròpia coberta. Tot i que l'impacte seria de petita magnitud, caldria fer una avaluació i, posteriorment, un estudi d'impacte ambiental (EIA) [16]. L'efecte de la construcció de dita coberta sobre el medi físic i social vindria donat pels materials emprats per a la fabricació dels pilars, les bigues i la xapa del sostre, per l'ús de maquinaria durant la construcció de la coberta, per l'impacte visual que aquest podria causar durant la instal·lació sobre la pista, entre d'altres.

Pel que fa al medi social, un cop construïda i instal·lada la coberta en varis clubs esportius, es considerarà l'efecte sobre l'entorn sociocultural i econòmic.



Conclusions

La valoració del projecte desenvolupat és molt positiva. Ha estat molt enriquidor, doncs s'ha aprofundit en l'àmbit de la mecànica de fluids referent al comportament de fluxos al voltant d'un cos i s'ha adquirit un ampli coneixement i una gran agilitat amb el software CFX de l'ANSYS. Remarcar que s'han assolit els objectius establerts inicialment, utilitzant el programari CAD per al disseny del domini i el CAE per a dur a terme les simulacions:

- S'ha observat la forta influència de la variació de la fletxa de l'arc de la coberta sobre les accions fluidodinàmiques del vent sobre la mateixa.
- S'ha observat que al modificar el disseny, fent-lo en cada simulació més proper a l'estructura real, varien notablement les accions fluidodinàmiques del vent.
- El projecte és un estudi comparatiu que s'ha pogut dur a terme amb plena satisfacció, analitzant cada cas per separat i posteriorment fent-ne una discussió en conjunt.

A continuació una petita valoració de cada simulació en particular:

- *Simulació coberta simple*: S'observa que el C_D augmenta lleugerament amb la fletxa f i que el C_L disminueix significativament fins fer-se negatiu per la f màxima. Aquest comportament està associat als desprendiments de capa límit que generen deixants amb remolins de diferents dimensions i intensitats segons la fletxa. Concretament, les pressions en la superfície inferior són les que més influencien aquest comportament.
- *Simulació coberta amb biga*: El C_D , el C_L i la distribució de pressions es comporten de forma similar que amb la coberta simple però es produeix una afectació del flux per la superfície inferior que provoca desprendiment inclús per la fletxa mínima que no passava en el cas anterior.
- *Simulació coberta tancada*: Els resultats d'aquesta simulació són totalment diferents dels obtinguts en els dos casos anteriors. Cal destacar que per tots els valors de fletxa les forces de sustentació són negatives i cap avall. De totes formes, aquests resultats són orientatius degut a que simulen condicions ideals de vent estacionari i exactament paral·lel al terra.

Cal tenir en compte que l'abast d'aquest projecte s'ha establert tenint en compte la durada d'un quadrimestre. Durant la realització d'aquest, l'interès en la matèria i en el projecte ha anat creixent i han sorgint idees per ampliar-lo. Les vies de continuació del projecte són:

- Realitzar les simulacions de la coberta amb biga i coberta tancada amb una biga no simplificada i observar si varien els resultats.
- Realitzar un estudi sobre l'acció del vent i veure com varien les accions fluidodinàmiques en funció de la direcció i l'angle d'incidència del vent.

- Realitzar la simulació de la coberta amb tota l'estructura en un cas 3D.



Agraïments

M'agradaria donar les gràcies al meu tutor, Xavier Escaler, per oferir-me la possibilitat de participar en aquest projecte que he trobat no només interessant en l'àmbit acadèmic sinó molt enriquidor a nivell personal. Així com també pel suport rebut durant la realització d'aquest, guiant-me, aconsellant-me i resolent tots els dubtes que m'han sorgit. La seva disposició ha sigut incondicional, fins i tot durant períodes de vacances.

Així mateix, agrair a Miquel Casafont per orientar-nos i guiar-nos inicialment i assessorar-nos en l'anàlisi dels resultats des del punt de vista de la resistència de materials i estructures.

Per últim, agrair també el suport incondicional de la meua família i dels meus amics, que m'han fet costat i m'han ajudat a afrontar els reptes que se m'han anat plantejant al llarg del desenvolupament del projecte i durant el transcurs d'aquests quatre anys.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] OFICINA DE VIVIENDA, *Código Técnico de la Edificación. Documento Básico SE-AE (Seguridad Estructural: Acciones en la Edificación)*, setembre 2007 [Consulta: 09/01/2016]

<<http://www.madrid.org/cs/Satellite?blobcol=urldata&blobheader=application/pdf&blobkey=id&blobtable=MungoBlobs&blobwhere=1310559772658&ssbinary=true>>

- [2] MIGUEL VARELA, *Historia del pádel, Capítulo I: El origen y nacimiento del pádel*, setembre 2015 [Consulta: 10/11/2015]

<<http://www.time2padel.com/noticia/2533-historia-del-padel-capitulo-i-el-origen-y-nacimiento-del-padel>>

- [3] MIGUEL VARELA, *Historia del pádel, Capítulo II: La expansión del pádel en Argentina y España*, octubre 2015 [Consulta: 10/11/2015]

<<http://www.time2padel.com/noticia/2538-historia-del-padel-capitulo-ii-la-expansion-del-padel-en-argentina-y-espana>>

- [4] ISMAEL CANCHO, *Ventajas e inconvenientes de las pistas de pádel indoor y exterior*, febrero 2015 [Consulta: 23/10/2015]

<<http://www.newpadel.es/blog/ventajas-e-inconvenientes-de-las-pistas-de-padel-indoor-y-exterior/>>

- [5] INCOPERFIL, *Cubierta pista de pádel*, [Consulta: 23/10/2015]

<<http://incoperfil.com/cubierta-pista-de-padel-cms-1-50-406/>>

- [6] FRANK M. WHITE, *Mecánica de fluidos*, Sexta Edición 2008 McGraw-Hill Interamericana de España, S.A.U [Consulta: 17/12/2015]

- [7] ALONDRA TORRES, *Número Reynolds*, Universidad Iberoamericana, Laboratorio de Operaciones Unitarias, Ciudad de México 2008 [Consulta: 27/12/2015]



- [8] SAM ADAM, *Fluid flow* [Consulta: 31/12/2015]
<<http://alevelnotes.com/Fluid-Flow/112?tree=>>>
- [9] JOSEP M. BERGADÀ GRAÑÓ, *Mecánica de fluidos. Breve introducción teórica con problemas resueltos*, UPCGRAU, novembre 2012 iniciativa Digital Politècnica [Consulta: 27/12/2015]
- [10] Introduction to ANSYS CFX, Lecture 10: Turbulence, 2012. [Consulta: 25/12/2015]
- [11] Clancy, L.J. (1975) *Aerodynamics*, Pitman Publishing Limited, London. ISBN 0 273 01120 0 [Consulta: 25/12/2015]
- [12] UNIVERSIDAD DE LA RIOJA, DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA, *Dinámica de fluidos computacional, CFD* [Consulta: 12/12/2015]
<<http://www.unirioja.es/cu/manuruiz/simulacion%20que%20es%20cfid.shtml>>
- [13] ANSYS 2016, Inc., *Ansys CFX* [Consulta: 14/12/2015]
<<http://www.ansys.com/Products/Simulation+Technology/Fluid+Dynamics/Fluid+Dynamics+Products/ANSYS+CFX>>
- [14] OFICINA DE VIVIENDA, *Acciones Variables (CTE-DB-SE-AE)*, diapositiva 7 [Consulta 09/01/2016]
<<http://www.structurat.es/mediapool/78/784930/data/acciones.pdf>>
- [15] MICHAEL PAGE, *Servicio de Selección de Ingenieros junior, intermedios y directivos* [contacto vía email]
- [16] GONZÁLEZ, M. *Consideraciones ambientales para los PFC*. Dpto. Proyectos de Ingeniería – UPC. Junio de 2011 [Consulta: 04/01/2015]

Bibliografia complementària

En aquest apartat s'inclouen exemples ja existents sobre cobertes per a pistes de pàdel i també la pàgina web on hi ha el llistat de normatives sobre estructures i accions sobre aquestes.

INCOPERFIL, *Cubierta curva autoportante en Ciudad Real*, setembre 2015 [Consulta: 23/10/2015]

<<http://incoperfil.com/tres-pistas-de-padel-en-la-alcazar-de-san-juan-ciudad-real-espana-com-1-50-49-314/>>

INCOPERFIL, *Cubierta curva autoportante en Jaén*, maig 2015 [Consulta: 23/10/2015]

<<http://incoperfil.com/cubierta-curvada-autoportante-para-complejo-municipal-deportivo-conocido-como-el-viejo-en-ubeda-jaen-espana-com-1-50-79-278/>>

INCOPERFIL, *Cubierta curva autoportante en Salamanca*, febrero 2015 [Consulta: 23/10/2015]

<<http://incoperfil.com/pista-de-padel-en-carbajosa-de-la-sagrada-salamanca-espana-com-1-50-79-277/>>

CYPE Ingenieros, *Normativa estructuras y instalaciones* [Consulta: 09/01/2016]

<<http://normativa.cype.es/>>

